



Universidad  
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

# ESTUDIO DEL EFECTO DE VARIAR LA CONICIDAD DE LA RUEDA DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO

Autor: **ANDER GOGENOLA ECHEANDIA**

Tutor: **HIGINIO RUBIO ALONSO**

Leganés, Abril de 2013



Título: Estudio del efecto de variar la conicidad de la rueda de un vehículo ferroviario  
Autor: Ander Gogenola Echeandia  
Director: Higinio Rubio Alonso

## EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_ de \_\_\_\_\_  
de 20\_\_ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de  
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Agradecimientos

Este proyecto se lo dedico a todas las personas que me han apoyado desde que empecé la carrera.

Me gustaría dar las gracias a toda mi familia que me ha apoyado a pesar de todas las dificultades, y en especial a mi mi novia Marta, que siempre ha confiado en mí en estos años difíciles.

Tampoco puedo olvidar a mis compañeros universitarios con los que he coincidido en mi estancia universitaria, a los que deseo lo mejor.

Y por último se lo agradezco a mi tutor Higinio por dedicarme su tiempo y proporcionarme el asesoramiento suficiente para realizar este proyecto.



# Resumen

El siguiente Proyecto Fin de Carrera tiene como objetivo desarrollar el procedimiento para cambiar la conicidad de las ruedas de un vehículo ferroviario mediante el software Adams Rail, y posteriormente hacer una comparativa de seis conicidades realizando simulaciones con distintos parámetros, diferentes velocidades y diferentes tramos de vía.

Primeramente hemos introducido conceptos básicos sobre vehículos ferroviarios, así como una pequeña introducción del software de simulación que vamos a utilizar para llevar a cabo el Proyecto Fin de Carrera.

Para el desarrollo de la aplicación práctica, en la cual explicamos el modelado del vehículo así como la descripción paso a paso para cambiar la conicidad de las ruedas, se ha utilizado como modelo del tren tipo Avant serie S-104 de Renfe.

Después de crear el vehículo y los diferentes archivos de cada conicidad, elaboramos y describimos el proceso para realizar simulaciones de precarga, estabilidad, dinámica y lineal, supuesto para el cálculo diferentes hipótesis, como son velocidades de 20 m/s y 30 m/s y tramos de vía recto y curvo.

Finalmente, para el estudio y discusión de los datos obtenidos en las simulaciones, se ha hecho uso del software Adams Postprocessor, donde se han generado las gráficas con los datos obtenidos en las simulaciones, como algunos videos en los que podemos observar el recorrido del vehículo a través del tramo de vía seleccionado.

Es importante destacar que aunque se valora el funcionamiento del vehículo con los diferentes conicidades, el objetivo del presente Proyecto Fin de Carrera, es elaborar el procedimiento a seguir para variar la conicidad en las ruedas de un vehículo ferroviario mediante el software Adams Rail

**Palabras clave:** conicidad, simulación, dinámica, rueda, Adams Rail y vehículo ferroviario.





# Abstract

The following Final Project aims to develop the procedure to change the conicity of the wheels of a railway vehicle by Adams Rail software, and then make a comparison of six tapers performing simulations with different parameters, different speeds and different sections of track.

First we introduced basic concepts of railway vehicles, as well as a brief introduction of simulation software that we will use to carry out the Final Project.

For the development of practical application, in which we explain the modeling of the vehicle as well as step-by-step to change the taper of the wheels, has been used as a model of type Tren Avant S-104 series of Renfe.

After creating the vehicle and the different files of each taper, make and describe the process for simulations of preload, stability, and dynamic linear assumption for calculating different scenarios, such as speeds of 20 m / s and 30 m / s and reaches straight and curved track.

Finally, for the study and discussion of the data obtained in the simulations, we have made use of the Adams postprocessor software, where the graphs were generated with the data obtained in the simulations, as some videos where we can see the path of the vehicle through the selected track section.

Importantly, although valued vehicle operation with different tapers, the objective of this Thesis, is to develop the procedure for varying the taper on the wheels of a railway vehicle by Adams Rail software

**Keywords:** taper, simulation, dynamic wheel, Adams Rail and rail vehicle.



# Índice general

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVACIÓN .....	1
1.2. OBJETIVOS PROPUESTOS .....	2
1.3. MEDIOS UTILIZADOS .....	2
1.4. FASES DE DESARROLLO .....	4
1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	5
<b>INTRODUCCIÓN A LOS FERROCARRILES .....</b>	<b>9</b>
2.1 CONCEPTOS GENERALES .....	10
2.1.1 LA VÍA.....	10
2.1.2 MATERIAL RODANTE.....	12
2.1.3 BOGIE .....	12
2.1.4 BASTIDOR.....	14
2.1.5 EJE CALADO .....	14
2.1.6 RUEDA FERROVIARIA .....	15
2.1.7 CAJA DE GRASA.....	17
2.1.8 SISTEMA DE SUSPENSIÓN .....	18
2.1.9 VAGÓN O CUERPO DEL TREN .....	19
2.2 CONTACTO RUEDA-CARRIL.....	20
2.2.1 TEORÍA DE HERTZ. PROBLEMA NORMAL. ....	21
2.2.2 TEORÍA DE KALKER. PROBLEMA TANGENCIAL. ....	24
<b>TREN AVANT SERIE S-104.....</b>	<b>28</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	30
3.2 TRAYECTOS.....	31
3.3 ESPECIFICACIONES.....	31
<b>SOFTWARE MSC. ADAMS RAIL .....</b>	<b>36</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	38

<b>4.2. MODOS DE USUARIOS .....</b>	<b>40</b>
<b>4.3. MODOS DE TRABAJO DISPONIBLES .....</b>	<b>41</b>
<b>4.4. BASE DE DATOS .....</b>	<b>42</b>
<b>4.5. INTERFAZ DE USUARIO .....</b>	<b>43</b>
<b>4.6. PROPIEDADES DEL MODELADO DEL VEHÍCULO .....</b>	<b>44</b>
<b>4.7. TIPOS DE ANÁLISIS .....</b>	<b>45</b>
<b><u>MODELADO TREN AVANT SERIE S-104 .....</u></b>	<b><u>48</u></b>
<b>5.1. PROCEDIMIENTO GENÉRICO DE MODELIZACIÓN .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2. CREACIÓN DE UN SUBSISTEMA DE BOGIE FRONTAL .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3. CÓMO CREAR UN SUBSISTEMA DE BOGIE TRASERO .....</b>	<b>53</b>
<b>5.4. CÓMO CREAR UN SUBSISTEMA DE CARROCERÍA .....</b>	<b>54</b>
<b>5.5. CÓMO CREAR UN ENSAMBLE DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO COMPLETO .....</b>	<b>55</b>
<b><u>PROCEDIMIENTO PARA EL CAMBIO DE CONICIDAD .....</u></b>	<b><u>58</u></b>
<b>6.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>60</b>
<b>6.2 CONCEPTOS GENERALES .....</b>	<b>61</b>
6.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS .....	61
6.2.2 ARCHIVO DE PROPIEDADES .....	63
<b>6.3 CONFIGURACIÓN DEL PERFIL DE LA RUEDA .....</b>	<b>71</b>
6.3.1 OBTENCIÓN DEL ARCHIVO DE PROPIEDADES DE LA RUEDA. ....	75
6.3.2 CALCULO DE LOS NUEVOS VALORES DE CONICIDAD .....	78
<b><u>SOFTWARE MSC. POSTPROCESSOR .....</u></b>	<b><u>86</u></b>
<b>7.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>88</b>
<b>7.2 MENÚS DISPONIBLES EN ADAMS POSTPROCESSOR .....</b>	<b>88</b>
<b>7.3 CÓMO IMPORTAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>90</b>
<b>7.4 CÓMO VISUALIZAR UN ARCHIVO DE DEMANDA .....</b>	<b>93</b>
7.4.1 COMO REALIZAR GRÁFICO DE UN CÁLCULO DINÁMICO .....	93
7.4.2 PROCESO PARA REALIZAR LA GRÁFICA UN CÁLCULO DE ESTABILIDAD	101
<b>7.5 VISUALIZACIÓN DE UN ARCHIVO DE GRÁFICOS .....</b>	<b>102</b>
<b><u>RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES .....</u></b>	<b><u>104</u></b>
<b>8.1 INTRODUCCION .....</b>	<b>105</b>
<b><u>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</u></b>	<b><u>223</u></b>
<b>9.1 CONCLUSIONES .....</b>	<b>225</b>
<b>9.2 TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>227</b>
<b><u>PRESUPUESTO .....</u></b>	<b><u>229</u></b>
<b>10.1 FASES TEMPORALES DE DESARROLLO .....</b>	<b>231</b>
<b>10.2 COSTES .....</b>	<b>233</b>
<b><u>GLOSARIO .....</u></b>	<b><u>237</u></b>
<b><u>REFERENCIAS .....</u></b>	<b><u>239</u></b>
<b><u>PLAN DE TRABAJO .....</u></b>	<b><u>241</u></b>

# Índice de figuras

Figura 1: Tren Renfe media distancia .....	1
Figura 2: Características software MSC. ADAMS RAIL.....	3
Figura 3: Diagrama explicativo de las distintas fases del proyecto. ....	5
Figura 4: : Partes del perfil de un raíl.....	11
Figura 5: Esquema general de bogie Y-25.....	13
Figura 6: Bastidor de un bogie. ....	14
Figura 7: Conjunto de eje y ruedas (eje calado).....	15
Figura 8: Perfil de una rueda ferroviaria .....	16
Figura 9: Designación del perfil de una rueda ferroviaria. ....	17
Figura 10: Vista interior de una caja de grasa.....	17
Figura 11: Suspensión primaria y secundaria .....	18
Figura 12: Caja o cuerpo de un ferrocarril. ....	19
Figura 13: Contacto rueda-carril .....	22
Figura 14: Descomposición de la zona de contacto.....	25
Figura 15: Tren Avant serie S-104.....	30
Figura 16: Bogie Tren Avant serie S-104. ....	32
Figura 17: Esquema de una simulación computacional.....	39
Figura 18: Archivo de configuración.....	42
Figura 19: Interfaz de usuario. ....	43
Figura 20: Eje de coordenadas del carril y de la rueda .....	45
Figura 21: Pasos a seguir para la creación de un modelo en Adams Rail.....	51
Figura 22: Menú para crear un subsistema.....	53
Figura 23: Menú para modificar un punto de unión.....	54
Figura 24: Menú para crear un nuevo ensamblaje. ....	56
Figura 25: Plantilla de un ensamblaje (vista lateral).....	56
Figura 26: Plantilla de un ensamblaje (vista ISO). ....	57
Figura 27: Modelo tren Avant serie S-104.....	61
Figura 28: Perfil de rueda.....	62
Figura 29: Movimiento de lazo esquematizado. ....	63
Figura 30: Representación del perfil del raíl UIC 60 con Curve Manager. ....	66

Figura 31: Riel estándar 860 UIC 60 .....	66
Figura 32: Parámetros que definen la irregularidad de una vía. ....	68
Figura 33: Menú de irregularidades en Curve Manager. ....	68
Figura 34: Menú wheelset. ....	71
Figura 35: Modificación del wheelset y acceso a Curve Manager. ....	72
Figura 36: Acceso al Curve Manager.....	73
Figura 37: Perfil de rueda de conicidad 1/40 .....	74
Figura 38: Archivo de propiedades de la rueda .....	75
Figura 39: Archivo en formato PRM de la conicidad de las ruedas. ....	76
Figura 40: Ubicación del punto donde se inicia la conicidad de la rueda.....	77
Figura 41: Crear archivo .wpf .....	79
Figura 42: Selección del archivo de propiedades de la rueda .....	80
Figura 43: Perfil de rueda de conicidad 1/10. ....	81
Figura 44: Perfil de rueda de conicidad 1/20. ....	81
Figura 45: Perfil de rueda de conicidad 1/30. ....	82
Figura 46: Perfil de rueda de conicidad 1/40. ....	82
Figura 47: Perfil de rueda de conicidad 1/50 .....	83
Figura 48: Perfil de rueda plana. ....	83
Figura 49: Ventana de trabajo Adams Postprocessor. ....	89
Figura 50: Menú para importar archivo. ....	90
Figura 51: Representación de un archivo de demanda.....	91
Figura 52: Representación de un archivo gráfico.....	92
Figura 53: Menú de opciones de un archivo de demanda. ....	94
Figura 54: Menú para generar el cálculo de estabilidad. ....	101
Figura 55: Menú de opciones de un archivo gráfico.....	102
Figura 56: Posición de los resortes.....	107
Figura 57: Autovalores del análisis lineal .....	111
Figura 58: Primer modo (número 30 de la tabla 12). ....	112
Figura 59: Segundo modo (número 31 de la tabla 12). ....	112
Figura 60: Vagón sobre rail en simulación dinámica.....	115
Figura 61: Propiedades de contacto. ....	116
Figura 62: Trazado de la vía recta.....	119
Figura 63: Propiedades tramo recto de vía.....	119
<i>Figura 64: Trazado de la vía curva.....</i>	<i>170</i>
Figura 65: Representación de la vía curva con Curve Manager. ....	171

# Índice de tablas

Tabla 1: Valores de m y n en función del ángulo $\theta$ .....	23
Tabla 2: Coeficientes de Kalker .....	26
Tabla 3: Especificaciones generales Tren Avant serie S-104. ....	33
Tabla 4: Especificaciones técnicas Tren Avant serie S-104. ....	34
Tabla 5: Opciones de representación de parámetros 1.....	95
Tabla 6: Opciones de representación de parámetros 2.....	96
Tabla 7: Opciones de representación de parámetros 3.....	97
Tabla 8: Opciones de representación de parámetros 4.....	98
Tabla 9: Opciones de representación de parámetros 5.....	99
Tabla 10: Opciones de representación de parámetros 6.....	100
Tabla 11: Resultados precarga .....	106
Tabla 12: Resultado análisis lineal.....	110
Tabla 13: Modos propios de vibración del bogie frontal. ....	112
Tabla 14: Tramo de vía recto recorrido.....	117
Tabla 15: Conicidades usadas en las simulaciones .....	118
Tabla 16: Aceleración longitudinal en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.. ....	122
Tabla 17: Aceleración longitudinal en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40. ....	123
Tabla 18: Aceleración longitudinal en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.....	124
Tabla 19: Velocidades longitudinales en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.....	127
Tabla 20: Velocidades longitudinales en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.....	128
Tabla 21: Velocidades longitudinales en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana..	129
Tabla 22: Desplazamientos laterales en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20. ....	132
Tabla 23: Desplazamientos laterales en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40. ....	133
Tabla 24: Desplazamientos laterales en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana....	134
Tabla 25: Desplazamientos verticales en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20. ...	137
Tabla 26: Desplazamientos verticales en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40. ...	138
Tabla 27: Desplazamientos verticales en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana..	139
Tabla 28: Fuerzas Fx en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20. ....	142
Tabla 29: fuerzas Fx en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40. ....	143
Tabla 30: Fuerzas Fx en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.....	143

Tabla 31: Fuerzas $F_y$ en tramo recto de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	147
Tabla 32: Fuerzas $F_y$ en tramo recto de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	148
Tabla 33: Fuerzas $F_y$ en tramo recto de las conicidades $1/50$ ; plana.	149
Tabla 34: Fuerzas $F_z$ en tramo recto de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	152
Tabla 35: Fuerzas $F_z$ en tramo recto de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	153
Tabla 36: Fuerzas $F_z$ en tramo recto de las conicidades $1/50$ ; plana.	154
Tabla 37: Momentos $T_x$ en tramo recto de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	157
Tabla 38: Momentos $T_x$ en tramo recto de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	158
Tabla 39: Momentos $T_x$ en tramo recto de las conicidades $1/50$ ; plana.	158
Tabla 40: Momentos $T_y$ en tramo recto de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	162
Tabla 41: Momentos $T_y$ en tramo recto de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	163
Tabla 42: Momentos $T_y$ en tramo recto de las conicidades $1/50$ ; plana.	164
Tabla 43: Momentos $T_z$ en tramo recto de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	167
Tabla 44: Momentos $T_z$ en tramo recto de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	168
Tabla 45: Momentos $T_z$ en tramo recto de las conicidades $1/50$ ; plana.	169
Tabla 46: Tramo de vía curvo recorrido.	172
Tabla 47: Aceleración longitudinal en tramo curvo de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	175
Tabla 48: Aceleración longitudinal en tramo curvo de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	176
Tabla 49: Aceleración longitudinal en tramo curvo de las conicidades $1/50$ ; plana.	177
Tabla 50: Velocidades longitudinales en tramo curvo de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	180
Tabla 51: Velocidades longitudinales en tramo curvo de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	181
Tabla 52: Velocidades longitudinales en tramo curvo de las conicidades $1/50$ ; plana.	182
Tabla 53: Desplazamientos laterales en tramo curvo de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	185
Tabla 54: Desplazamientos laterales en tramo curvo de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	185
Tabla 55: Desplazamientos laterales en tramo curvo de las conicidades $1/50$ ; plana.	186
Tabla 56: Desplazamientos verticales en tramo curvo de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	190
Tabla 57: Desplazamientos verticales en tramo curvo s de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	191
Tabla 58: Desplazamientos verticales en tramo curvo s de las conicidades $1/50$ ; plana.	192
Tabla 59: Fuerzas $F_x$ en tramo curvo de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	195
Tabla 60: fuerzas $F_x$ en tramo curvo de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	196
Tabla 61: Fuerzas $F_x$ en tramo curvo de las conicidades $1/50$ ; plana.	197
Tabla 62: Fuerzas $F_y$ en tramo curvo de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	200
Tabla 63: Fuerzas $F_y$ en tramo curvo de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	201
Tabla 64: Fuerzas $F_y$ en tramo curvo de las conicidades $1/50$ ; plana.	202
Tabla 65: Fuerzas $F_z$ en tramo curvo de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	205
Tabla 66: Fuerzas $F_z$ en tramo curvo de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	206
Tabla 67: Fuerzas $F_z$ en tramo curvo de las conicidades $1/50$ ; plana.	207
Tabla 68: Momentos $T_x$ en tramo curvo de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	210
Tabla 69: Momentos $T_x$ en tramo curvo de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	211
Tabla 70: Momentos $T_x$ en tramo curvo de las conicidades $1/50$ ; plana.	212
Tabla 71: Momentos $T_y$ en tramo curvo de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	215
Tabla 72: Momentos $T_y$ en tramo curvo de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	216
Tabla 73: Momentos $T_y$ en tramo curvo y de las conicidades $1/50$ ; plana.	217
Tabla 74: Momentos $T_z$ en tramo curvo de las conicidades $1/10$ ; $1/20$ .	220
Tabla 75: Momentos $T_z$ en tramo curvo de las conicidades $1/30$ ; $1/40$ .	221
Tabla 76: Momentos $T_z$ en tramo curvo de las conicidades $1/50$ ; plana.	222
Tabla 77: Desarrollo temporal del proyecto.	233
Tabla 78: Desarrollo de costes del proyecto	235





# **MEMORIA DEL PROYECTO FIN DE CARRERA**



# Capítulo I

## Introducción

## 1.1. MOTIVACIÓN

Como bien se sabe, el vehículo ferroviario, es uno de los medios de transporte mas utilizados, ya sea para trayectos largos o para cortos, como puede ser los “Cercanías” y el Metro. Posee grandes ventajas competitivas frente a los demás transportes públicos tales como consumo de combustible, impacto medioambiental o la posibilidad de transportar a un número de personas muy elevado.



*Figura 1: Tren Renfe media distancia*

Los factores requeridos a un vehículo ferroviario son confort, velocidad y ruido, siendo los dos primeros los más importantes ya que afectan directamente a la seguridad del pasajeros. Para el estudio de estos factores se realizan simulaciones dinámicas en las cuales el contacto rueda-carril, es una de las características mas importantes que hay que estudiar y en la cual la conicidad de las ruedas es uno de los factores decisivos en el comportamiento de ferrocarril.

Gracias a la tecnología existen software de simulación dinámica de vehículos ferroviarios que nos permiten obtener los resultados y datos necesarios requeridos para la construcción de nuestro vehículo con la máxima eficacia a un coste mínimo. Nos permiten obtener respuestas

a cuestiones ingenieriles como el comportamiento de un modelo al interactuar con una geometría determinada de vía.

MSC. Adams Rail, es uno de los software de simulación dinámica de vehículos ferroviarios más populares y extendidos. Está basado en la dinámica de sistemas multicuerpo, y nos permite obtener resultado de nuestras simulaciones con diferentes hipótesis de cálculo, así como crear un modelo para realizar dichas simulaciones.

## **1.2. OBJETIVOS PROPUESTOS**

El principal objetivo que se ha exigido para este Proyecto Fin de Carrera, es la realización de una guía detallada sobre el procedimiento para cambiar la conicidad de las ruedas de nuestro vehículo utilizando el software de simulación MSC. Adams Rail.

Para la consecución de objetivo marcada se ha requerido la cumplir los siguientes objetivos:

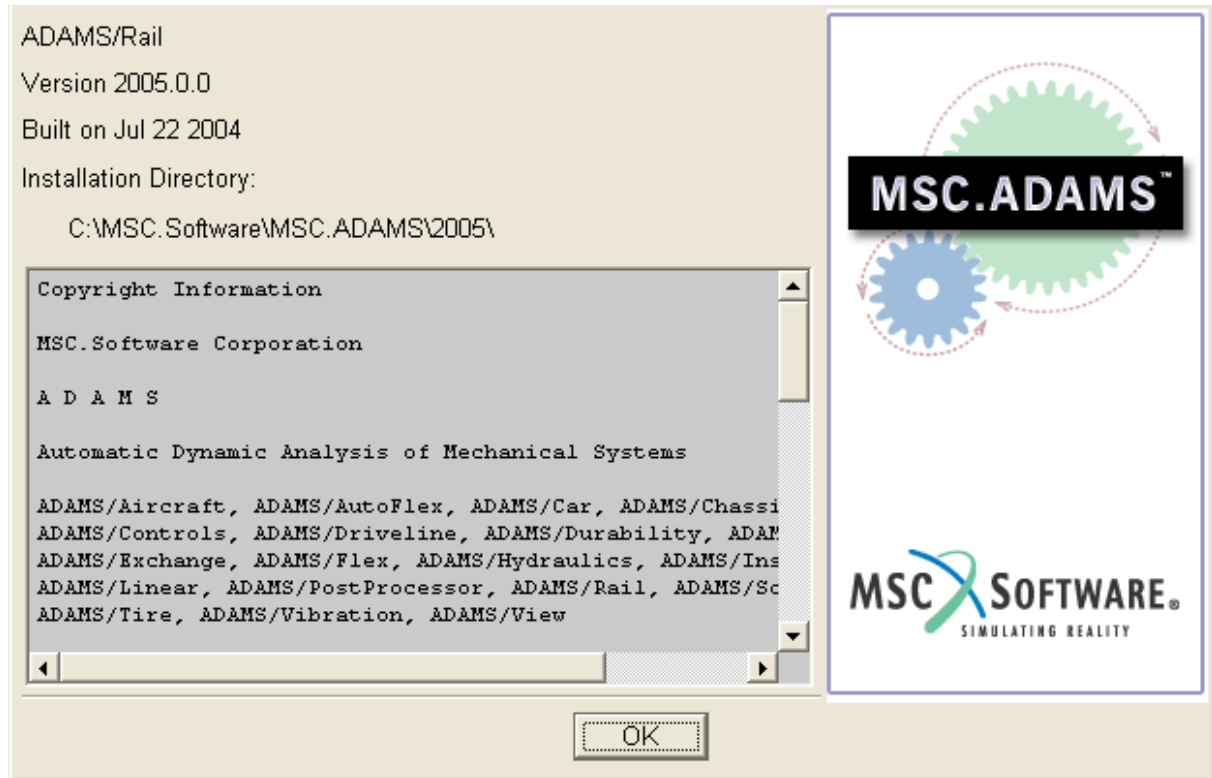
- Detallar el funcionamiento básico de software MSC. Adams Rail, explicando los aspectos mas relevantes del programa y los modos de usuario, para introducirnos en el funcionamiento del programa.
- Describir los pasos a seguir para modelar un vehículo ferroviario y detallar el procedimiento para realizar las simulaciones pertinentes, utilizando de modelo el tren tipo Avant modelo S-104 de Renfe.
- Realización de una guía detallada sobre los pasos a seguir a la hora de cambiar la conicidad de las ruedas de nuestro vehículo y posteriormente observar los resultados obtenidos sobre el comportamiento dinámico de nuestro vehículo.
- Crear una guía de usuario sobre el funcionamiento básico del software Adams Postprocessor para posteriormente representar los datos obtenidos en las simulaciones.
- Observar el comportamiento dinámico de nuestro vehículo en condiciones de funcionamiento diferentes, y con conicidades diferentes, consiguiendo obtener resultados importantes para la seguridad de los pasajeros.

## **1.3. MEDIOS UTILIZADOS**

En cuanto a los medios utilizados para llevar a cabo este Proyecto Fin de Carrera, como se ha nombrado en este mismo apartado, para el modelado y simulación del vehículo ferroviario, así como del archivo de propiedades de las ruedas creados, se realizará mediante el uso de software MSC.Adams en su módulos Rail y Postprocessor para el tratamiento de los resultados obtenidos en las simulaciones.

MSC. Adams (*Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems*) es un software para simulación dinámica de sistemas mecánicos que a través de la implementación de herramientas numéricas ofrece gran variedad de elementos que se utilizan para modelar casi cualquier sistema mecánico.

La característica más importante que podemos encontrar en el software, es su capacidad de adaptación a las necesidades de cada usuario se observan en la *figura 2*.



***Figura 2: Características software MSC. ADAMS RAIL***

También utilizaremos el paquete de Microsoft Office for Mac 2011, para el tratamiento de los datos, especialmente su hoja de cálculo Excel for Mac 2011 para el caculo de las distintas conicidades, como del programa Word for Mac 2011 para la redacción de la memoria y de PowerPoint for Mac 2011 para realizar las diapositivas de la presentación, así como EditText, un editor de texto necesario para definir las conicidades.

Por último también haremos uso del programa Omniplan, para administrar el seguimiento del proyecto, creación asignación de recursos a tareas, dar seguimiento al progreso, analizar cargas de trabajo.

Para comprender y poder utilizar el programa MSC. Admas nos hemos basado en las ayudas proporcionadas por el software, información encontrada a través páginas de internet, así como también la experiencia propia obtenida con el uso del programa.

## 1.4. FASES DE DESARROLLO

En un proyecto de ingeniería genérico hay que definir unas fases de desarrollo para la consecución del objetivo perseguido. En este caso se trata de un proyecto en el que se dispone de mayor libertad de diseño ya que no está basado en ningún estudio previo.

Para la obtención del objetivo perseguido, se abordarán las siguientes fases:

- **Fase 1.** *Búsqueda y estudio de Documentos.*

En esta primera fase, se proponen objetivos y motivación del proyecto. También se lleva a cabo una búsqueda de información de conceptos generales de ferrocarriles, así como el estudio del contacto existente entre la rueda y la vía por la que circula nuestro vehículo, ya que es un parámetro decisivo a la hora de observar el comportamiento dinámico del vehículo, el cual se ve afectado por la conicidad de las ruedas.

La utilización de MSC. Adams Rail, software con el que se han llevado a cabo los diferentes análisis posteriores al modelado, el cual fue realizado con el mismo software, conlleva un aprendizaje previo, dicho aprendizaje será expuesto a modo de guía de usuario, convirtiéndose así en una herramienta útil para otros usuarios que desean o necesiten trabajar con esta herramienta. Se realizará un estudio sobre los módulos Rail y Postprocessor.

- **Fase 2.** *Modelado y Simulación del vehículo.*

A lo largo de esta segunda fase, se ha realizado el modelado del tren tipo Avant serie S-104 de Renfe, gracias a la información recopilada en la fase anterior, se crearan las diferentes conicidades que se utilizará para el presente Proyecto Fin de Carrera y se creará una guía paso a paso con la información necesaria para cambiar la conicidad de las ruedas de nuestro vehículo.

Por último se realizarán las simulaciones con las diferentes hipótesis de estudio para posteriormente, en la siguiente fase del proyecto, realizar un análisis de los resultados obtenidos.

- **Fase 3.** *Representación de los resultados.*

Lo que nos proponemos en esta fase es, una vez realizadas todas las simulaciones establecidas en la fase 2, obtener y representar los resultados obtenidos en dichas simulaciones, principalmente con del software MSC. Adams Postprocessor y ayudados en algunos casos también de la hoja de cálculo Excel de Microsoft Office 2010.

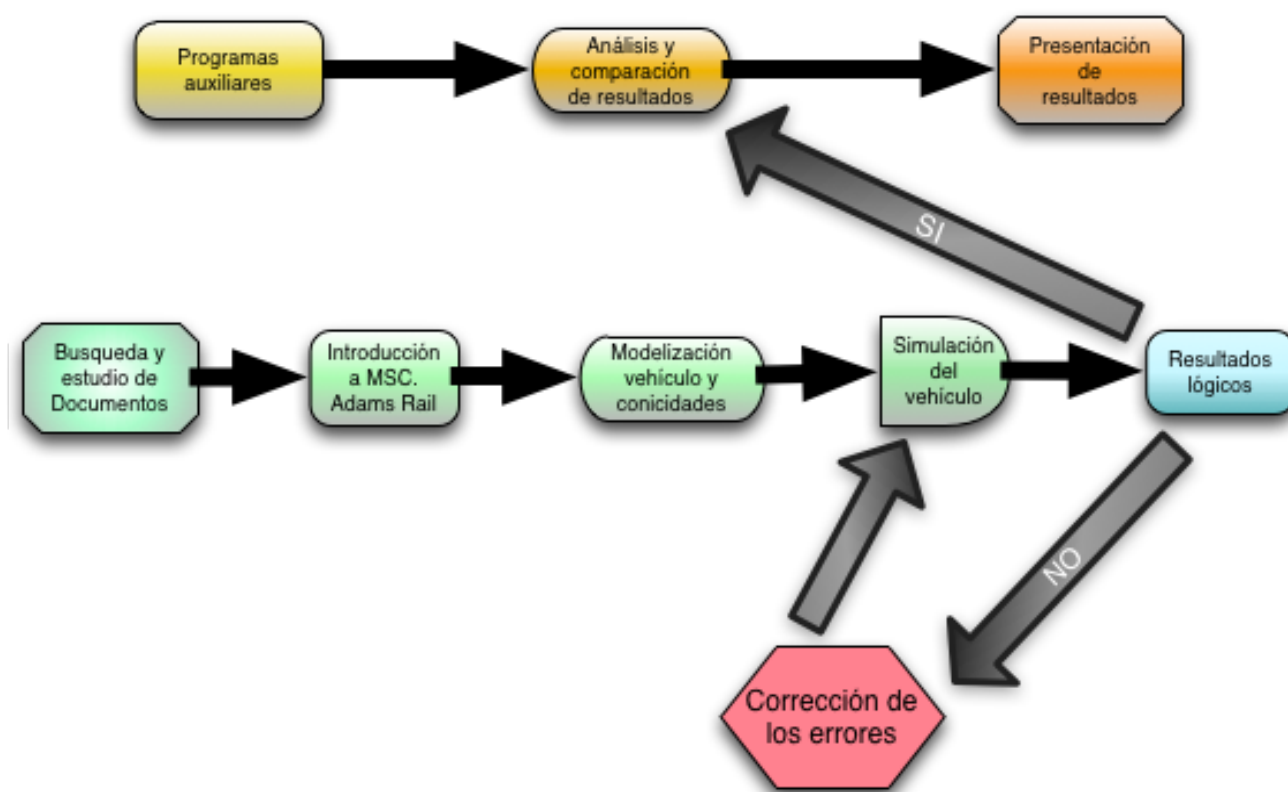
Se crearán gráficas comparativas, donde se observará los diferentes resultados obtenidos para su posterior discusión y presentación de conclusiones.

La fase 2 y la fase 3 se repetirán sucesivamente para las diferentes conicidades estudiadas.

- **Fase 4. Redacción de la memoria.**

En esta última fase se redactará la memoria, el presupuesto empleado y el seguimiento del proyecto gracias a los datos e información obtenida en las fases anteriores.

En la *figura 3*, se presenta un diagrama explicativo de las diferentes fase del proyecto para ayudar a la comprensión de las mismas.



*Figura 3: Diagrama explicativo de las distintas fases del proyecto.*

## 1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Esta memoria se va a distribuir en capítulos, un apartado sobre referencias documentales empleadas y anexos. A continuación describimos cada uno de los contenidos de los mismos.



### ❖ Capítulo I : Introducción.

En este primer capítulo se presenta las motivaciones que han inspirado este proyecto, así como los objetivos que se quiere obtener y medios utilizados para poder conseguirlos.

También las fases de desarrollo seguidas para la obtención de los objetivos descritos.

### ❖ Capítulo II: Introducción a los Ferrocarriles.

Se describen algunos de los conceptos fundamentales para introducir al lector en el ámbito de los vehículos ferroviarios para obtener una mejor comprensión del presente proyecto.

También se presentará una descripción de los conceptos sobre las teorías de contacto entre las ruedas y el carril, ya que nos ayudarán a entender los resultados obtenidos tras las simulaciones cuando cambiamos la conicidad de nuestro vehículo.

### ❖ Capítulo III: Tren Avant serie S-104.

Descripción de las características del tren que vamos a utilizar como modelo para nuestras simulaciones con el software MSC. Adams Rail, y al cual vamos a ir variando las conicidades de sus ruedas para observar su comportamiento dinámico.

### ❖ Capítulo IV: Software MSC. Adams Rail.

Descripción sobre el software del que vamos a hacer uso para la realización del modelado y simulación del vehículo, tales como modos de usuario, estructuración de archivos, etc.

### ❖ Capítulo V: Realización del modelo.

En este capítulo modelamos nuestro vehículo y se describe los pasos a seguir mediante la interfaz estándar del software MSC. Adams Rail.

### ❖ Capítulo VI: Modificación de la Conicidad.

Este será el capítulo clave de nuestro Proyecto Fin de Carrera, ya que describiremos paso a paso como se realiza el cambio en la conicidad de las ruedas del vehículo ferroviario, que es el objetivo principal del presente Proyecto.

También describiremos los archivos de propiedades que intervendrán en nuestro estudio, los cuales habría que modificar para obtener un contacto rueda-carril óptimo para un estudio real de nuestro vehículo.

❖ Capítulo VII: Manejo de MSC. Adams Postprocessor.

Se realiza la descripción del software MSC. Adams Postprocessor, el cual utilizaremos para la obtención de los resultados y de para la creación de las gráficas que utilizaremos para la discusión de los datos obtenidos en nuestras simulaciones.

❖ Capítulo VIII: Resultados obtenidos.

Se representan los datos obtenidos, junto con las gráficas de los parámetros considerados de importancia para nuestro estudio, de las simulaciones realizadas, siendo estas: Precarga, análisis lineal, análisis dinámico y de estabilidad.

❖ Capítulo IX: Conclusiones y trabajos futuros.

Representación de las conclusiones adquiridas en el desarrollo del Proyecto Fin de Carrera realizado e ideas sobre trabajos futuros.

❖ Capítulo X: Planificación y presupuesto del proyecto.

Se presentan un esquema detallado sobre la planificación del proyecto realizado con el software Omniplan v2.2.1, y posteriormente se realiza un estudio sobre los costes directos e indirectos que ha requerido la realización del presente proyecto.

❖ Capítulo XI: Referencias.

Se indica las fuentes utilizadas a lo largo de la realización del presente proyecto.

❖ Anexo I:

Se incluye el archivo creado en el software Omniplan, el cual indicara las etapas llevadas a cabo para realizar el PFC.



# **Capítulo 2**

## **Introducción a los Ferrocarriles**

## 2.1 CONCEPTOS GENERALES

En el siguiente capítulo describiremos conceptos generales sobre ferrocarriles para ayudar al lector a una mejor comprensión del presente proyecto, como también describiremos las teorías en las cuales se basa el contacto entre rueda-carril, importantes a la hora del estudio del comportamiento dinámico del vehículo ferroviario cuando realizamos el cambio de las conicidades de las ruedas nuestro vehículo.

### 2.1.1 LA VÍA

Se entiende por **vía** al camino por el que circulan los trenes. Por este motivo, su función consiste en el guiado de los vehículos ferroviarios de la forma más segura y económica posible. Cualquier fallo en la nivelación y alineación de la vía, producen vibraciones en el tren, repercutiendo en el confort de los pasajeros, e incluso se pueden generar daños en la estructura.

La estructura de la vía está constituida principalmente por: los carriles, los traviesas, las placas de asiento, las sujeciones del carril, el balasto, el sub-balasto y la plataforma

#### 2.1.1.1 El carril

Se denomina carril, rail, trillo o riel, a cada una de las barras metálicas sobre las que se desplazan las ruedas de los trenes y tranvías. Los rieles se disponen como una de las partes fundamentales de las vías férreas y actúan como soporte, dispositivo de guiado y elemento conductor de la corriente eléctrica.

La característica técnica más importante del ferrocarril es el contacto entre el riel y la rueda con pestaña, siendo sus principales cualidades su material, forma y peso.

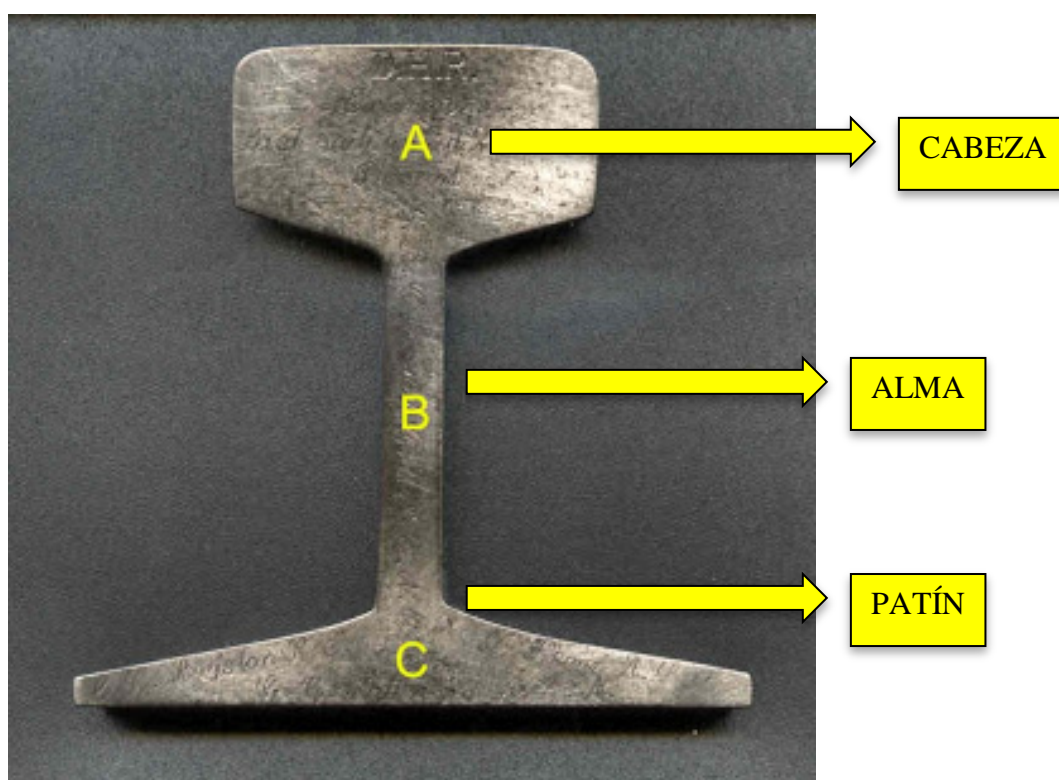
El perfil que se utiliza actualmente es el *Vignole*, el cual consta de una cara inferior ancha, destinada al apoyo sobre los durmientes, y una cara superior, más angosta y de mayor altura, destinada a guiar y sostener las ruedas [1].

### Partes que componen un raíl

En un raíl pueden distinguirse las siguientes zonas:

- **Cabeza:** Parte superior, que se utiliza como elemento de rodadura.
- **Patín:** Base, de anchura mayor que la cabeza, cuya superficie inferior es plana para su apoyo en la traviesa.
- **Alma:** Parte de pequeño espesor que une la cabeza con el patín [1].

En la *figura 4* se indican las partes del perfil de un raíl ferroviario del tipo *Vignole*.



*Figura 4: : Partes del perfil de un raíl*

### Requisitos que debe cumplir el raíl:

Los requisitos que debe cumplir un raíl son los siguientes:

- Resistir directamente las tensiones que recibe del material rodante y transmitir las, a su vez, a los otros elementos que componen la estructura de la vía.
- Realizar el guiado de las ruedas en su movimiento.
- Servir de conductor de la corriente eléctrica para la señalización y la tracción en las líneas electrificadas [1].

**Dureza y materiales:**

En cuanto a la dureza de los raíles, éste debe coincidir con el de las ruedas, siendo la dureza interna 341 HB o superior. Esta dureza depende del tratamiento superficial (estructura microperlítica) y de los compuestos del acero de los raíles, que son: el hierro, carbono, silicio, azufre, fósforo, arsénico y otros minerales e impurezas [1].

**Fuerzas aplicadas:**

Los vehículos ferroviarios se caracterizan por tener un guiado automático, proporcionado por el contacto entre rueda y carril. Así, gracias a la geometría del carril y de la rueda, el tren transcurre de forma estable y seguro por la vía [2].

La figura 13 muestra cómo es ese contacto entre una sección del carril y una sección de una rueda de tren. En este caso, se observa un momento en el que además de existir contacto en la zona de rodadura, zona 1, existe contacto en la zona de la pestaña, zona 2, que es la parte de la rueda que limita el desplazamiento lateral del tren sobre la vía. En la imagen, se pueden apreciar también las fuerzas producidas en cada punto de contacto.

**2.1.2 MATERIAL RODANTE**

El material rodante son todos los equipos que circulan (ruedan) a lo largo de las vías férreas. Se dividen en dos grupos:

- Material tractivo: son las locomotoras.
- Material ó equipos de arrastre: todos los que la locomotora arrastra o empuja acoplados a ella, sobre las vías.

Por otra parte, al conjunto de equipos rodantes unidos entre sí que son arrastrados o empujados por la locomotora, o están en la vía en espera de serlo, se le denomina formación. Al conjunto de la locomotora con la formación se le llama tren. Los trenes atendiendo al tipo de servicio que prestan se les denominan; de carga, de pasajeros, de servicios, de obras o mixtos [3].

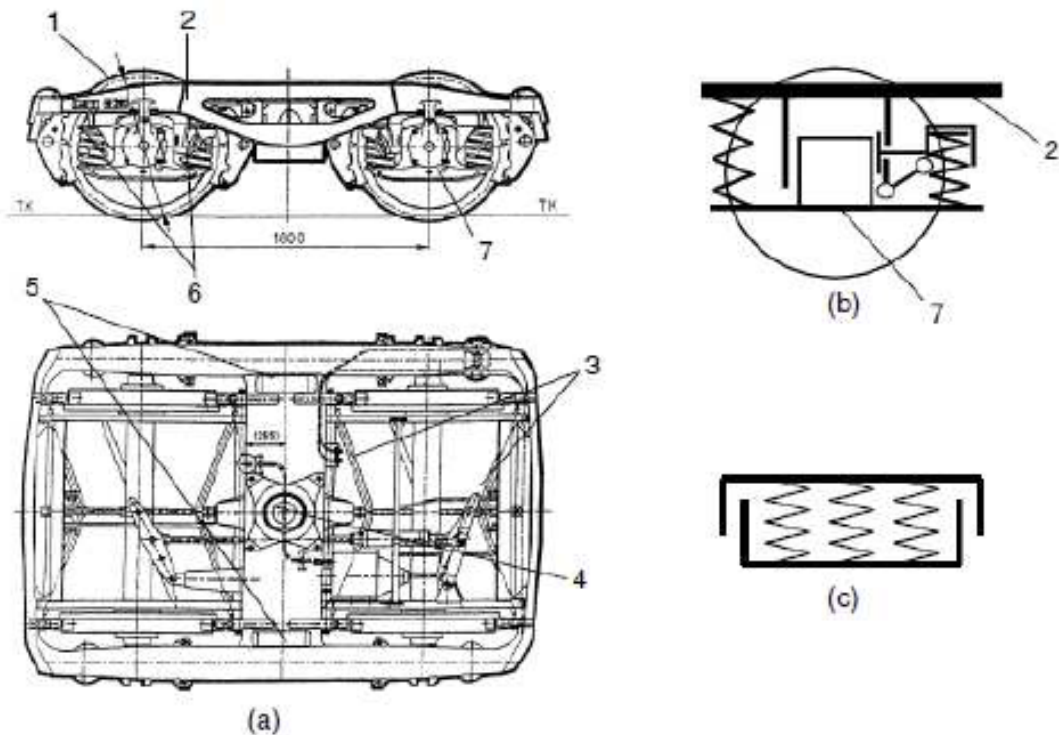
**2.1.3 BOGIE**

El boje o bogie es un conjunto de dos o tres pares de ruedas, según modelo, montadas sobre sendos ejes próximos, paralelos y solidarios entre sí, que se utilizan en ambos extremos de los vehículos de gran longitud destinados a circular sobre rieles. El vehículo se apoya en cada bogie por medio de un eje vertical mediante un pivote, gracias al que puede describir curvas muy cerradas. En definitiva, es la estructura rodante sobre la que descansan los vagones de ferrocarril y las locomotoras actuales, que no utilizan ejes simples [4].

Se puede encontrar bogies tractores y bogies remolcados, éstos últimos sin fuerza de tracción. Además, se pueden distinguir entre bogies destinados a trenes para el transporte de viajeros o bogies orientados a trenes de mercancías, cuya diferencia radica en que éstos últimos no suelen llevar suspensión secundaria ya que el fin de ésta es mejorar el confort en la caja.

En la *figura 5* se representa el bogie modelo Y-25, indicando sus componentes.

- a) Vista general
- b) Esquema de la suspensión primaria (amortiguador Lenoir)
- c) Esquema de elástico del sistema de rodamiento
1. Juego de ruedas
2. Chasis rígido en forma de H
3. Palanca de frenado
4. Cazoleta central
5. Cojinetes laterales
6. Conjunto de muelles
7. Caja del eje (o caja de grasa)



**Figura 5: Esquema general de bogie Y-25.**

Por tanto, podemos definir al bogie como a un bastidor que puede girar respecto al chasis del vagón, en el cual va montado el tren de rodadura. Como se ha descrito, se compone principalmente de dos ejes (normalmente) montados sobre el bastidor, los cuales incorporan una suspensión propia denominada suspensión primaria. Además, puede existir una suspensión entre el chasis y el bastidor del bogie denominada suspensión secundaria.

De manera general, las principales funciones del bogie son [5]:

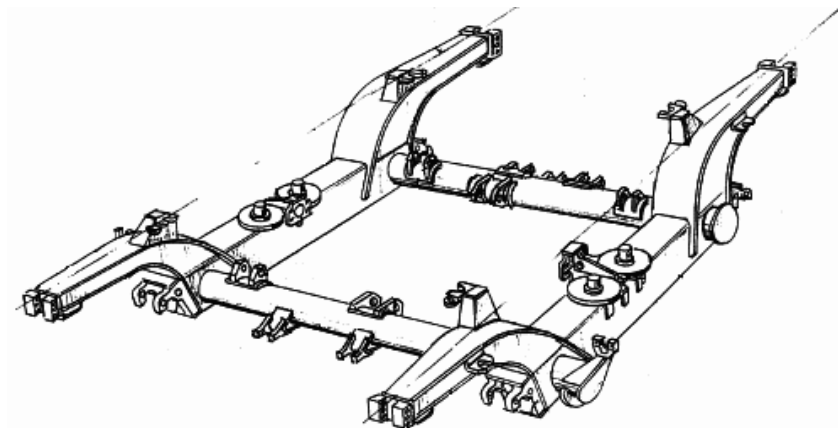


- Guiar el vehículo a lo largo de la vía.
- Trabajar de forma estable tanto en recta como en curva.
- Transmitir de la carga vertical de las ruedas del vehículo a los raíles.
- Controlar las fuerzas dinámicas producidas durante el trayecto.
- Aplicar de una forma correcta las fuerzas de tracción y frenado.
- Realizar una amortiguación eficiente frente a oscilaciones.
- Disminuir el desgaste producido por el contacto rueda-carril.
- Garantizar el confort, debido a la capacidad de absorber las vibraciones causadas por las irregularidades de la vía, así como minimizar la acción de la fuerza centrífuga en el paso por curva.

### 2.1.4 BASTIDOR

Es la estructura metálica donde se asientan el resto de componentes del bogie. Suele ser sustancialmente rectangular y está formada por dos elementos longitudinales unidos entre sí por otros dos elementos transversales. Los elementos longitudinales y los transversales están constituidos por vigas huecas de sección transversal cerrada sin soldaduras de material de aportación [6].

En la *figura 6* se representa el bastidor de un bogie de un vehículo ferroviario.



*Figura 6: Bastidor de un bogie.*

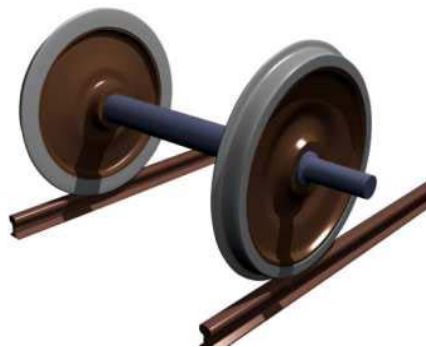
### 2.1.5 EJE CALADO

Pieza cilíndrica que une dos de las ruedas de un vehículo ferroviario, soportando también las cajas de grasa y los elementos de transmisión.

Por extensión, también se conoce como eje, al conjunto formado por el propio eje y las dos ruedas, pudiendo ser en este caso motriz, si ejerce tracción o portante, si no lo hace. Este conjunto se une al bastidor del bogie mediante la suspensión primaria para atenuar las irregularidades de la vía.

Las ruedas del ferrocarril suelen estar fijas al eje, así ambas ruedas giran al unísono y proporcionan la misma velocidad angular, así como una distancia constante entre las ruedas. Debido a que ambas ruedas giran a la misma velocidad, éstas sufren un desgaste al paso de las curvas ya que, al tener más recorrido la rueda exterior se produce un deslizamiento entre la rueda y el carril, aumentando así la resistencia a rodadura, y causando desgaste entre rueda y raíl. La solución es fabricar la superficie de rodadura de las ruedas con un perfil cónico cuyo ángulo  $\gamma$  de inclinación sea variable con respecto al eje montado [7].

En la *figura 7* se representa el dibujo de un conjunto de eje y rueda de un vehículo ferroviario.



*Figura 7: Conjunto de eje y ruedas (eje calado).*

### 2.1.6 RUEDA FERROVIARIA

Las ruedas y los ejes de transmisión son las partes más críticas del material rodante ferroviario. Un fallo mecánico o un exceso en las dimensiones del diseño pueden causar el descarrilamiento. Debido a esto es necesario realizar inspecciones periódicas para determinar el estado de su geometría y ver si existen grietas o defectos en el material [5].

Actualmente, existen diferentes modelos de ruedas ferroviarias, entre las que destacan:

- Ruedas macizas.
- Ruedas con llanta.
- Ruedas ensambladas.

De forma general, las ruedas permiten:

- Soportar el peso del vehículo.
- Guiar al vehículo por la vía.
- Frenar y traccionar al vehículo.
- Transmitir al carril los esfuerzos.
- Lograr circular en curva.

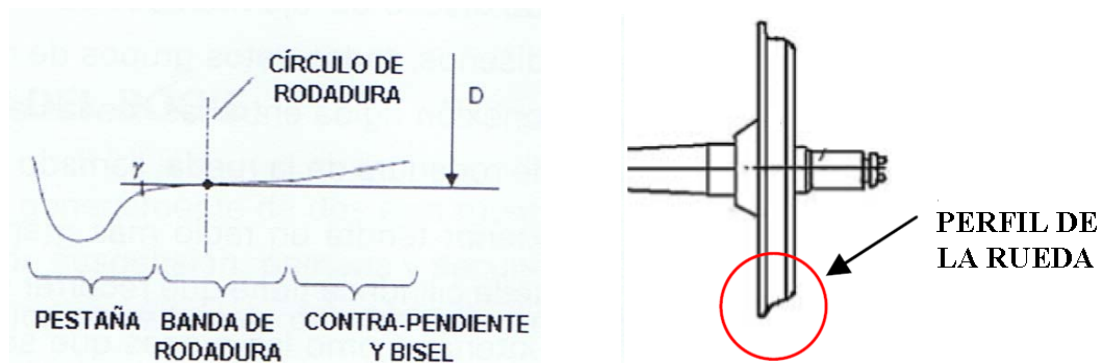
La forma con la que se diseña tanto el perfil de la rueda en la zona de rodadura como la cabeza del carril condiciona fuertemente la respuesta del vehículo desde el punto de vista de diversos factores, como son la estabilidad, ausencia de vibraciones, la capacidad de inscripción en curva, el desgaste de ruedas y carriles y la seguridad de rodadura entre otros. El perfil de la rueda posee una zona de rodadura con unos parámetros característicos para el buen comportamiento dinámico del vehículo [8].

En la *figura 8* se puede apreciar la imagen de una rueda ferroviaria real circulando por un raíl.



***Figura 8: Perfil de una rueda ferroviaria***

En la *figura 9* se indica la designación con la que se nombra a cada zona del perfil de una rueda ferroviaria.



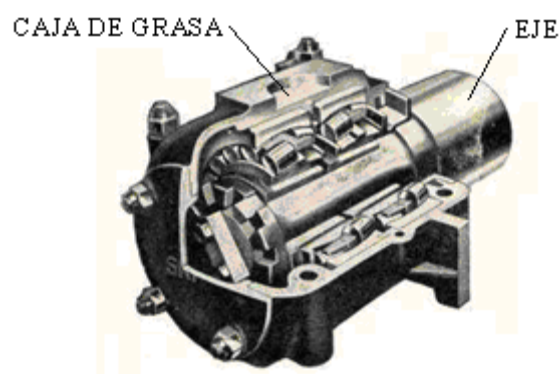
*Figura 9: Designación del perfil de una rueda ferroviaria.*

### 2.1.7 CAJA DE GRASA

Es el depósito de grasa utilizado para lubricar los elementos de rodadura de un vehículo ferroviario. Se coloca entre el eje de las ruedas y el bastidor y sobre ella se fijan los resortes o ballestas que soportan el bastidor del vehículo, transmitiendo la carga a la parte final de la rueda. Proporciona la unión entre los ejes y el bastidor y facilita la rodadura de los ejes, disminuyendo el rozamiento y con ello el calentamiento del eje. Permite además transmitir los esfuerzos de frenado desde los ejes a la masa del vehículo.

Existen dos tipos principales de cajas de grasa, las que utilizan cojinetes de fricción y las que usan cojinetes de rodillos. Éstas últimas son las más utilizadas ya que tienen el coeficiente de rozamiento menor y, además, bajos costes de mantenimiento y reparación [9].

En la *figura 10* se representa la sección de una caja de grasa donde se puede apreciar sus componentes.



*Figura 10: Vista interior de una caja de grasa.*

### 2.1.8 SISTEMA DE SUSPENSIÓN

Se conoce por suspensión al conjunto constituido por los elementos elásticos, amortiguadores y todo aquel elemento que une los ejes calados a la carrocería del coche. Los bogies generalmente disponen de dos etapas de suspensión: la suspensión primaria que conecta los ejes con la estructura del bogie, y la suspensión secundaria situada entre el bastidor del bogie y el chasis del vagón. Con respecto a la amortiguación, se utiliza de manera general en el ámbito ferroviario tanto la fricción seca como la viscosa [5].

#### A) Suspensión primaria

Se encuentra situado entre los ejes y el bastidor del bogie. Se encarga de filtrar las vibraciones producidas por las irregularidades transmitidas desde la vía hasta las ruedas, evitando que dicha vibración influya en los demás sistemas del vehículo. Además asegura un correcto reparto de pesos sobre las ruedas, evitando de esta forma la pérdida de contacto entre ambas, que podría desencadenar grandes inestabilidades.

La configuración típica de una suspensión primaria es un conjunto de muelle helicoidal más amortiguador por cada extremo del eje.

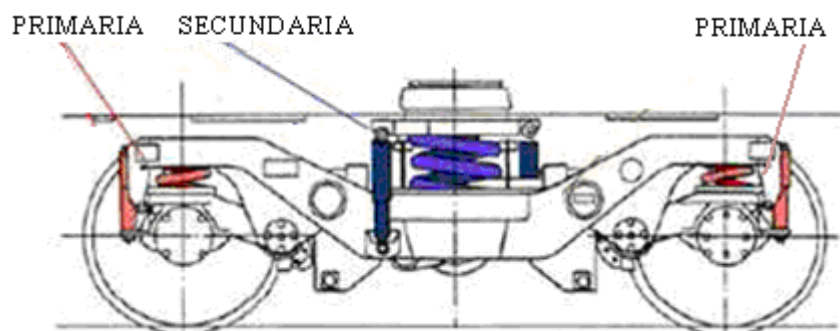
#### B) Suspensión secundaria

La suspensión secundaria está localizada entre el bastidor del bogie y la caja del vehículo y se encarga de filtrar las vibraciones que se producen en el bogie para que, de esta manera, no lleguen hasta los pasajeros o la mercancía [6].

Existen dos tipos comunes de suspensión secundaria:

- Configuración de resortes helicoidales y amortiguadores hidráulicos verticales y laterales.
- Configuración de resortes neumáticos y amortiguadores hidráulicos laterales.

En la *figura 11* se muestra una configuración de bogie con suspensión primaria y suspensión secundaria con resortes helicoidales.



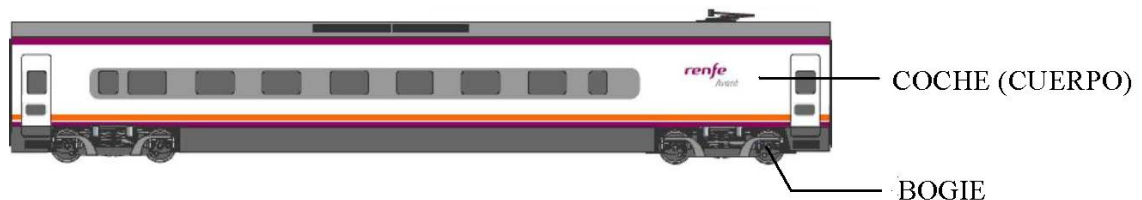
**Figura 11: Suspensión primaria y secundaria**

### 2.1.9 VAGÓN O CUERPO DEL TREN

Un vagón es un tipo de material rodante ferroviario autónomo que puede acoplarse con otros para formar un tren y que no tiene tracción propia. Es el elemento del tren que más peso introduce al vehículo por lo que se busca la mayor ligereza dentro de la robustez requerida para la carga. El vagón se apoya sobre los ejes o bogies mediante los elementos de la suspensión secundaria. Existen, principalmente, tres tipos de vagones:

- Los vagones de mercancías.
- Los coches de pasajeros y su equipaje (se considera incorrecto llamarlo vagón).
- Los furgones, que tienen una función diferente al resto de los vehículos del tren.

En la *figura 12* se muestra la imagen de un vagón de mercancías, indicándose el bogie.



*Figura 12: Caja o cuerpo de un ferrocarril.*

## 2.2 CONTACTO RUEDA-CARRIL

La modelización del contacto rueda-raíl es uno de problemas más importantes en el comportamiento dinámico ferroviario. Pero debido a la complejidad presente en el desarrollo de las ecuaciones que describen su comportamiento, el contacto rueda-raíl se trata de uno de los fenómenos menos conocidos en el ámbito ferroviario. Para conocer lo que ocurre en la zona de contacto, es necesario estudiar el comportamiento de dos sólidos elásticos con un movimiento de rodadura entre ellos, bajo la acción de cargas tanto normales como tangenciales a la zona de contacto. Esta zona de contacto se puede dividir a su vez en dos zonas:

- · Zona de adhesión.
- · Zona de deslizamiento.

En los últimos 100 años han aparecido diferentes teorías que tratan de definir tanto la forma como la extensión de cada una de las zonas del área de contacto. La primera teoría que intentaba explicar este fenómeno fue la desarrollada por Carter [10] en 1926; Carter consideró la superficie de contacto como una franja rectangular, por lo que su principal problema es que sólo tenía en cuenta los pseudo-deslizamientos longitudinales. En 1958, Johnson [11] transformó la teoría de Carter, debido a que consideraba una superficie de contacto circunferencial, teniendo en cuenta, por consiguiente tanto los pseudo-deslizamientos longitudinales y transversales.

Pocos años después, en 1964, Johnson con la ayuda de Vermeulen [12] definieron la forma de la zona de contacto como elipsoidal, la cual estaba dividida en dos regiones asimétricas: una zona de adhesión y otra de deslizamiento. Entre 1963 y 1964, se desarrolló una teoría para el pseudo-deslizamiento longitudinal puro, gracias a los estudios realizados por Haines y Ollerton [13] y de Halling [14]. En estos estudios se dividía el área de contacto en franjas paralelas a la dirección de rodadura, y a cada una de estas franjas era aplicable la teoría desarrollada por Carter. Esta teoría fue comprobada mediante resultados experimentales, comprobando su validez y pudiendo ser utilizada a día de hoy en el caso de que solo existan pseudo-deslizamientos longitudinales.

Por último, Kalker [15], en 1967, desarrolló una teoría que se caracterizaba por la suposición de que las fuerzas de contacto tangenciales y los pseudo-deslizamientos eran lineales; en la que se pudo comprobar que si los pseudo-deslizamientos longitudinales, transversales y de giro son muy pequeños, el área de adhesión representa toda la zona de contacto. La teoría de Kalker, aunque es muy utilizada, hay que tener en cuenta sus limitaciones, debido a las suposiciones realizadas, por este motivo, Kalker desarrolló una teoría más exacta, la cual tiene el inconveniente de que su uso supone un gran coste computacional. Por este motivo hay que tener en cuenta al usar esta última teoría de Kalker, los beneficios obtenidos en relación al tiempo computacional necesario para llevarlo a cabo.

Todas estas teorías consideran un comportamiento Hertziano, así como que las características físicas de ambos cuerpos en contacto son casi-idénticas; estas suposiciones simplifican mucho el problema y tienen la ventaja de que se puede dividir el problema en dos, uno en el plano normal y otro en el tangencial, pudiendo



obtener por separado la fuerza normal y la forma de la superficie de contacto, a partir del problema normal y las fuerzas en el contacto, mediante el problema tangencial.

### Definición de pseudo-deslizamiento

De forma general, el movimiento entre dos cuerpos se puede clasificar en dos grupos:

- **Rodadura pura:** Tiene lugar cuando en un instante de tiempo, el punto de contacto de la rueda con el raíl tiene velocidad nula.
- **Deslizamiento puro:** Este movimiento se caracteriza en que solo se produce cuando la fuerza tangencial aplicada llega al límite de fricción.

Posteriormente, mediante diferentes estudios se descubrió un estado en el que la zona de contacto se puede dividir en una zona de adhesión y una zona de deslizamiento, actuando los dos estados al mismo tiempo. De forma que debajo del valor límite de fricción existe una zona de deslizamiento, bautizada con el nombre de pseudodeslizamiento.

A continuación se pueden observar las expresiones de los pseudo-deslizamientos:

$$\varepsilon_x = \frac{\text{velocidad longitudinal real} - \text{velocidad longitudinal de rodadura pura}}{\text{velocidad longitudinal debido a la rodadura}} \quad ec. 1$$

$$\varepsilon_y = \frac{\text{velocidad lateral real} - \text{velocidad lateral de rodadura pura}}{\text{velocidad lateral debido a la rodadura}} \quad ec. 2$$

$$\varphi = \frac{\text{velocidad angular del cuerpo superior} - \text{velocidad angular del cuerpo inferior}}{\text{velocidad nominal de rodadura}} \quad ec. 3$$

## 2.2.1 TEORÍA DE HERTZ. PROBLEMA NORMAL.

Hertz [16] demostró que cuando dos cuerpos elásticos se someten a presión el uno contra el otro en las siguientes condiciones:

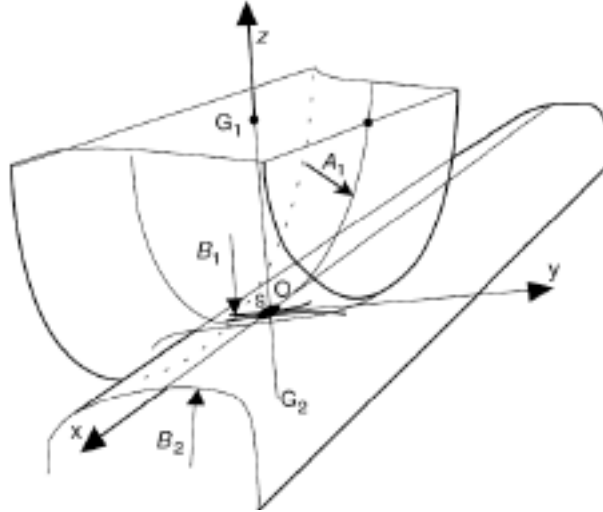
- Comportamiento elástico.
- Espacio semi-infinito.
- Radio de curvatura mucho más grande que la zona de contacto.
- Curvatura constante dentro de la zona de contacto.

Entonces:

- La superficie de contacto es una elipse.
- La superficie de contacto se considera plana.
- La presión de contacto es una semi-elipsoide

En la *figura 13* podemos observar la representación del contacto Hertziano en el campo ferroviario:





**Figura 13: Contacto rueda-carril**

Como la superficie de contacto es elíptica, es necesario definir sus semiejes, “a” y “b”:

$$a = m \cdot \left[ \frac{3 \cdot \pi \cdot N}{4} \cdot \frac{K_1 + K_2}{K_3} \right]^{1/3} \quad \text{ec. 4}$$

$$b = n \cdot \left[ \frac{3 \cdot \pi \cdot N}{4} \cdot \frac{K_1 + K_2}{K_3} \right]^{1/3} \quad \text{ec. 5}$$

Con:

$$K_1 = \frac{1 - \nu_w^2}{\pi \cdot E_w} ; K_2 = \frac{1 - \nu_R^2}{\pi \cdot E_R} ; K_3 = \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R'_w} + \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R'_R} \right) \quad \text{ec. 6}$$

Y siendo:

N = Fuerza normal total que actúa en la zona de contacto.

$R_w$  = Radio de curvatura de la rueda.

$R'_w$  = Radio de curvatura transversal de la rueda.

$R_R$  = Radio de curvatura del carril.

$R'_R$  = Radio de curvatura transversal del carril.

$\nu_i$  = coeficiente de Poisson de la rueda o del carril.

$E_i$  = Modulo de Young de la rueda o carril.

m, n = Coeficientes dependientes del ángulo  $\theta$ , cuyo valor se obtiene de la tabla siguiente, de tal manera que:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{K_4}{K_3} \right) \quad \text{ec. 7}$$

$$K_4 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{R_W} + \frac{1}{R'_W} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R'_R} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_W} - \frac{1}{R'_W} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{R_R} - \frac{1}{R'_R} \right)^2 \cdot \cos 2\varphi \right] \quad ec. 8$$

Donde  $\varphi$ , representa el ángulo formado por los planos normales que contienen a las curvaturas  $\frac{1}{R_W}$  y  $\frac{1}{R_R}$ . Se representa en la *tabla 1* los valores de m y n en función del ángulo  $\theta$ .

**Tabla 1: Valores de m y n en función del ángulo  $\theta$**

$\theta$ (°)	m	n	$\theta$ (°)	m	n	$\theta$ (°)	m	n
0.5	61.4	0.1018	10	6.604	0.3112	60	1.486	0.717
1	36.89	0.1314	20	3.813	1.4123	65	1.378	0.759
1.5	27.48	0.1522	30	3.731	0.493	70	1.284	0.802
2	23.26	0.1691	35	3.397	0.530	75	1.202	0.846
3	16.5	0.1964	40	3.3136	0.567	80	1.128	0.893
4	13.31	0.2188	45	1.926	0.604	85	1.061	0.944
6	9.79	0.2552	50	1.754	0.641	90	1.000	1.000
8	7.86	0.285	55	1.611	0.678			

Una vez determinados los valores de los semiejes a y b, podemos determinar el valor de la carga normal (N). Para ello calculamos primero la distribución de tensiones en dicha zona. Siendo ésta de la siguiente forma:

$$p(x, y) = p_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad ec. 9$$

Y una vez conocido el valor de la presión máxima en la zona de contacto ( $p_0$ ) y el área de la elipsoide, podemos calcular la carga normal (N) con la siguiente expresión:

$$N = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot p_0}{3} \quad ec. 10$$

### 2.2.2 TEORÍA DE KALKER. PROBLEMA TANGENCIAL.

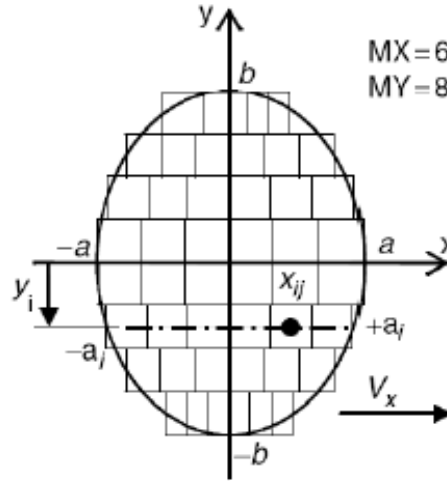
Kalker [17], en 1967, elaboró una teoría que permitía relacionar las fuerzas tangenciales en la zona de contacto con los pseudo-deslizamientos de una manera lineal. Esta teoría solo es válida cuando los pseudo-deslizamientos son pequeños, debido a la zona de adhesión cubre prácticamente toda el área de contacto. Pero en el caso de estar ante grandes pseudo-deslizamientos, Kalker desarrolló una teoría más compleja, implementándola en una rutina denominada CONTACT. Debido al coste computacional que supone su utilización, se desarrolló la teoría simplificada denominada FASTSIM [18], la cual será explicada a continuación debido a que es una de las rutinas utilizadas por el Adams/Rail para la resolución de la zona de contacto.

Fastsim se basa en la teoría simplificada del contacto rueda-raíl, originalmente una subrutina de Fortran, se ha convertido en una de las herramientas computacionales más fructíferas para el estudio dinámico en el mundo del ferrocarril; por este motivo, está siendo utilizado en programas tales como: Adams/rail, Medyna y Voco entre otros.

Fastsim se basa en la hipótesis de Hertz, por lo tanto:

- La superficie de contacto es elíptica y plana, la presión es un elipsoide.
- Los deslizamientos se estiman en el centro de la elipse.
- Los coeficientes de Kalker  $c_{ij}$  son constantes en cualquier lugar de la elipse.
- La superficie elíptica de contacto está dividida en franjas independientes, longitudinales y paralelas. Todas las bandas o franjas son divididas en el mismo número de elementos, el cálculo de la tensión comienza desde el borde principal, pasando de elemento a elemento.
- El método está simplificado: una deformación local corresponde a una fuerza local.

Para la resolución del problema, la superficie elíptica, mostrada en la *figura 14*, se descompone en franjas paralelas en la dirección de rodadura. Debido a la forma elíptica, los elementos no tienen la misma longitud  $a_i/MX$ .



**Figura 14: Descomposición de la zona de contacto.**

Una vez que está dividida la zona de contacto elíptica en diferentes franjas, podemos obtener la expresión que determina las fuerzas en el plano de contacto, mediante la distribución de presiones en cada uno de los dos ejes:

$$p_x(x, y_i) = \left( \frac{\varepsilon_x}{L_1} - y_i \frac{\varphi}{L_3} \right) (x - a_i) \quad \text{ec. 11}$$

Donde el primer término representa el desplazamiento longitudinal rígido medio, y el segundo, el efecto de giro como un desplazamiento rígido local en el punto (x,y) de la franja.

$$p_y(x, y) = \frac{\varepsilon_y}{L_2} (x - a_i) + \frac{\varphi}{2L_3} (x^2 - a_i^2) \quad \text{ec. 12}$$

Por consiguiente, el valor de las fuerzas lineales de contacto son:

$$F_x = - \iint p_x(x) \cdot d_x \cdot d_y = - \frac{8a^2 b s_x}{3L_1} \quad \text{ec. 13}$$

$$F_y = - \iint p_y(y) \cdot d_x \cdot d_y = - \frac{8a^2 b s_y}{3L_2} - \frac{\pi a^3 b \varphi}{4L_3} \quad \text{ec. 14}$$

Siendo:

a = semieje de la elipse en la dirección longitudinal.

b = semieje de la elipse en la dirección transversal.

$\varepsilon_x$  = pseudo-deslizamiento longitudinal.

$\varepsilon_y$  = pseudo-deslizamiento lateral.

$\varphi$  = pseudo-deslizamiento de giro.

$$L_1 = \frac{8a}{3c_{11}G} ; L_2 = \frac{8a}{3c_{22}G} ; L_3 = \frac{\pi a \sqrt{a/b}}{4c_{23}G}$$

ec. 15, 16 y 17

Por último definiremos el valor que toman los distintos coeficientes de Kalker  $c_{ij}$  en función de los valores de los semiejes de la elipse, así como del coeficiente de Poisson, que como podemos observar en la siguiente tabla, sólo están definidos para valores de Poisson comprendidos de 0, 0.25 y 0.5. Por lo que, en la mayoría de los casos debido a que el coeficiente de Poisson del acero está cercano a 0.27, es necesario interpolar para obtener el valor del coeficiente de Kalker que necesitamos.

En la *tabla 2*, se representan los coeficientes de Kalker en función de los semiejes de la elipse.

**Tabla 2: Coeficientes de Kalker**

		$C_{11}$			$C_{22}$			$C_{23} = -C_{32}$			$C_{33}$		
$g$		$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2
0.0		$\pi^2/4(1-\sigma)$			$\pi^2/4 = 2,47$			$\pi\sqrt{g}/3$	—	—	$\pi^2/16(1-\sigma)g$		
a/b	0.1	2.51	3.31	4.85	2.51	2.52	2.53	0.334	0.473	0.731	6.42	8.28	11.7
	0.2	2.59	3.37	4.81	2.59	2.63	2.66	0.483	0.603	0.809	3.46	4.27	5.66
	0.3	2.68	3.44	4.80	2.68	2.75	2.81	0.607	0.715	0.889	2.49	2.96	3.72
	0.4	2.78	3.53	4.82	2.78	2.88	2.98	0.720	0.823	0.977	2.02	2.32	2.77
	0.5	2.88	3.62	4.83	2.88	3.01	3.14	0.827	0.929	1.07	1.74	1.93	2.22
	0.6	2.98	3.72	4.91	2.98	3.14	3.31	0.930	1.03	1.18	1.56	1.68	1.86
	0.7	3.09	3.81	4.97	3.09	3.28	3.48	1.03	1.14	1.29	1.43	1.50	1.60
	0.8	3.19	3.91	5.05	3.19	3.41	3.65	1.13	1.25	1.40	1.34	1.37	1.42
	0.9	3.29	4.01	5.12	3.29	3.54	3.82	1.23	1.36	1.51	1.27	1.27	1.27
b/a	1.0	3.40	4.12	5.20	3.40	3.67	3.98	1.33	1.47	1.63	1.21	1.19	1.16
	0.9	3.51	4.22	5.30	3.51	3.81	4.16	1.44	1.59	1.77	1.16	1.11	1.06
	0.8	3.65	4.36	5.42	3.65	3.99	4.39	1.58	1.75	1.94	1.10	1.04	0.954
	0.7	3.82	4.54	5.58	3.82	4.21	4.67	1.76	1.95	2.18	1.05	0.965	0.852
	0.6	4.06	4.78	5.80	4.06	4.50	5.04	2.01	2.23	2.50	1.01	0.892	0.751
	0.5	4.37	5.10	6.11	4.37	4.90	5.56	2.35	2.62	2.96	0.958	0.819	0.650
	0.4	4.84	5.57	5.57	4.84	5.48	6.31	2.88	3.24	3.70	0.912	0.747	0.549
	0.3	5.57	6.34	7.34	5.57	6.40	7.51	3.79	4.32	5.01	0.868	0.674	0.446
	0.2	6.96	7.78	8.82	6.96	8.14	9.79	5.72	6.63	7.89	0.828	0.601	0.341
	0.1	10.7	11.7	12.9	10.7	12.8	16.0	12.2	14.6	18.0	0.795	0.526	0.228



# Capítulo 3

## Tren Avant serie S-104





### 3.1 INTRODUCCIÓN

Para la realización del presente proyecto diseñaremos un vehículo ferroviario, de un solo coche, de acuerdo con las especificaciones del tren de alta velocidad, Avant serie S-104 de Renfe.

Los trenes de la serie 104 forman parte del contrato adjudicado el 25 de mayo de 2001 al consorcio integrado por las empresas Alstom y CAF y que incluía la construcción de un lote de 20 trenes de Alta Velocidad en ancho internacional para servicios de media distancia [19].

Los trenes de la serie 104, junto con la serie 114, son los primeros de Renfe y del mundo que han sido diseñados y construidos específicamente para prestar servicios en distancias medias a alta velocidad. Son trenes formados por cuatro coches, con posibilidad de marcha en tracción múltiple de hasta tres composiciones y con una velocidad máxima comercial de 250 km/h.

Estos trenes están específicamente diseñados para viajes cortos, a diferencia del servicio Ave. Al ser diseñados para ofrecer servicios de menos de una hora y media de viaje, no existe la clase club y el número de plazas de clase preferente es muy bajo, 31 plazas frente a 205 de clase turista. Únicamente el primer vagón, donde está la cafetería, es de clase preferente.

Estos trenes, pertenecen a la familia Pendolino desarrollados por la italiana Fiat Ferroviaria que sería posteriormente absorbida por Alstom, y por tanto tienen similitudes con los trenes de la serie S-490. Exteriormente son similares aunque tienen un coche más, un carenado sobre el techo y dos puertas por coche, excepto en el remolque cafetería. Las diferencias técnicas se centran en la falta de basculación, la diferente tensión (25 kV y 50 Hz en corriente alterna), el ancho de vía (1.435 mm), la velocidad máxima (250 km/h) y la mayor potencia (4.000 kw) [19].

En la *figura 15* podemos observar el tren Avant serie S-104 del cual nos basaremos para la realización del presente proyecto fin de carrera:



**Figura 15: Tren Avant serie S-104**

Como hemos comentado anteriormente, el Avant, es un tren fabricado por CAF y Alstom en Santa Perpetua de Mogoda, en Barcelona. Deriva directamente del Alaris español.

Alstom es una corporación francesa, con sede en Levallois-Perret, a las afueras de París. Es el primer constructor mundial de sistemas de generación de electricidad, y el segundo constructor ferroviario, tras Bombardier Transportation.

Por otra parte, Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles S.A. (CAF) es una empresa española con sede en Beasain (Guipúzcoa) que lleva décadas construyendo trenes y material ferroviario para las redes de ferrocarril metropolitano, suburbano, de largo recorrido y alta velocidad más importantes del mundo. Es uno de los líderes internacionales en el diseño, fabricación, mantenimiento y suministro de equipos y componentes para sistemas ferroviarios [24].

## **3.2 TRAYECTOS**

La serie 104 efectúa servicios "Avant" de alta velocidad regional (servicios que se denominaron en su inicio Lanzadera Ave). Los servicios Avant efectuados por la serie 104 son los siguientes [26]:

- ⇒ Córdoba - Sevilla desde el 29 de diciembre de 2004, alargado hasta Málaga el 20 de febrero de 2008.
- ⇒ Madrid - Ciudad Real - Puertollano, desde el 4 de enero de 2005.
- ⇒ Madrid - Toledo, desde el 15 de noviembre de 2005.
- ⇒ Barcelona-Camp de Tarragona - Lleida desde el 28 de abril de 2008.
- ⇒ Zaragoza-Calatayud y Zaragoza-Huesca desde el 28 de abril de 2008.

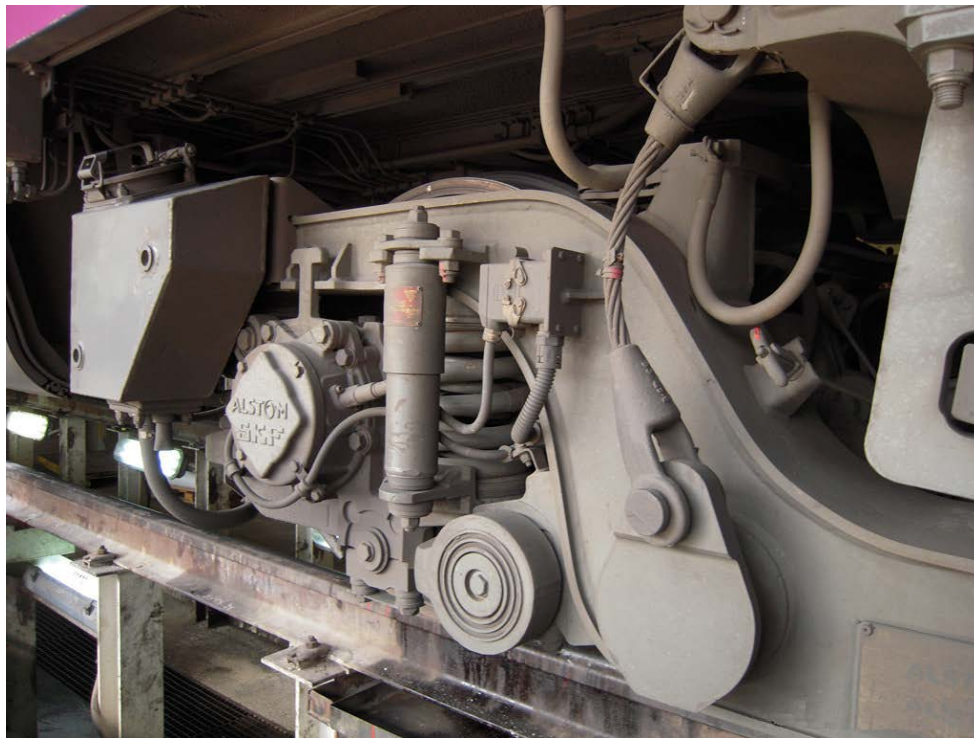
## **3.3 ESPECIFICACIONES**

Son trenes con la tracción distribuida: cada vagón cuenta con un convertidor de 1 MW y está motorizado con 2 motores asíncronos de 550 kW y dispone de 8 bogies cada uno de los cuales tienen tracción en uno de sus ejes. Además el sistema permite que, en caso de avería de alguno de los motores, el tren siga funcionando al 75% de su capacidad.

Como hemos comentado anteriormente, están constituidos por 4 coches. Los coches extremos disponen de una cabina de conducción en su extremo libre, siendo en uno de estos coches, donde se aloja en bar-cafetería.

Los ocho bogies motores disponen de un eje motor y un eje portador. El reductor está montado sobre el cuerpo de eje, accionado por un motor montado en la caja, a través de un árbol cardan. La suspensión primaria y secundaria está realizada con muelles helicoidales [25].

En la siguiente *figura 16* podemos observar el elemento bogie del tren Avant de la serie S-104 de Renfe.



***Figura 16: Bogie Tren Avant serie S-104.***

En las siguientes *tablas 3 y 4* representamos las especificaciones del vehículo ferroviario que vamos a utilizar para el presente proyecto fin de carrera. Tendremos tanto especificaciones generales como especificaciones técnicas, necesarias para la realización de los subsistemas mediante el software MSC. Adams Rail.[20]

## ■ **ESPECIFICACIONES GENERALES**

**Tabla 3: Especificaciones generales Tren Avant serie S-104.**

<b>Tipo de vehículo</b>	Tren de alta velocidad	<b>Velocidad máxima</b>	250 [km/h]
<b>Fabricante</b>	Alstom, CAF	<b>Aceleración de 0-100 km/h</b>	0,72 [m/s <sup>2</sup> ]
<b>Nº de unidades</b>	20	<b>Deceleración media a 120 km/h</b>	0,40 [m/s <sup>2</sup> ]
<b>Año de recepción</b>	2003-2005, primer servicio comercial el 29-12-2004.	<b>Deceleración media a 250 km/h</b>	0,50 [m/s <sup>2</sup> ]
<b>Estructura de caja</b>	Aluminio	<b>Potencia</b>	4.400 [kW], 18 [kW/t]
<b>Disposición ejes (UIC)</b>	(1Ao) (Ao1) (1Ao)(Ao1) (1Ao)(Ao1) (1Ao) (Ao1)	<b>Ancho de vía</b>	1,435 [m]
<b>Distancia entre topes</b>	107,10 [m]	<b>Tensión (CA)</b>	25 [kV] y 50 [Hz]
<b>Anchura máxima</b>	2,92 [m]	<b>Número de motores</b>	8 motores asíncronos de 550 [kW]
<b>Altura máxima</b>	4,123 [m]	<b>Sistemas de seguridad</b>	ASFA, LZB, ERTMS
<b>Longitud entre testeros</b>	25,90 [m]	<b>Mando múltiple</b>	4
<b>Paso libre puertas</b>	0,80 [m]	<b>Número de plazas</b>	237
<b>Peso en servicio</b>	242 [toneladas] (carga nominal considerando 100 kg por pasajero)	<b>Costo de compra</b>	13,22 [M€] y 55.767 [€/plaza]

▪ **ESPECIFICACIONES TÉCNICA**

**Tabla 4: Especificaciones técnicas Tren Avant serie S-104.**

<b>Ruedas</b>	Material: acero R8T-VR. Masa: 311 [kg].
<b>Caja de grasa</b>	Dispone de tres tipos diferentes de caja de grasa, aunque mecánicamente son iguales, están diferenciadas debido a los equipos de captación que incorpora cada una de ellas.
<b>Muelles</b>	<b><u>Suspensión primaria</u></b> Muelle externo: - Rigidez axial = 40,06 [daN/mm]. - Rigidez lateral = 41,00 [daN/mm].  Muelle interno: - Rigidez axial = 24,28 [daN/mm]. - Rigidez lateral = 10,10 [daN/mm].
	<b><u>Suspensión secundaria</u></b> Muelle externo: - Rigidez axial = 12,30 [daN/mm]. - Rigidez lateral = 10,50 [daN/mm].  Muelle intermedio: - Rigidez axial = 7,75 [daN/mm]. - Rigidez lateral = 2,90 [daN/mm].  Muelle interior: - Rigidez axial = 4,96 [daN/mm]. - Rigidez lateral = 0 [daN/mm].
	<b><u>Suspensión primaria:</u></b> - Amortiguador vertical: Extensión = 313,70 [daNs/mm]. Compresión = 313,30 [daNs/mm].
	<b><u>Suspensión secundaria:</u></b> - Amortiguador vertical = 316,00 [daNs/mm]. - Amortiguador horizontal = 2,45 [daNs/mm]. - Amortiguador antilazo = 34,30 [daNs/mm].
<b>Amortiguadores</b>	



# Capítulo 4

## Software MSC. Adams Rail





## 4.1. INTRODUCCIÓN

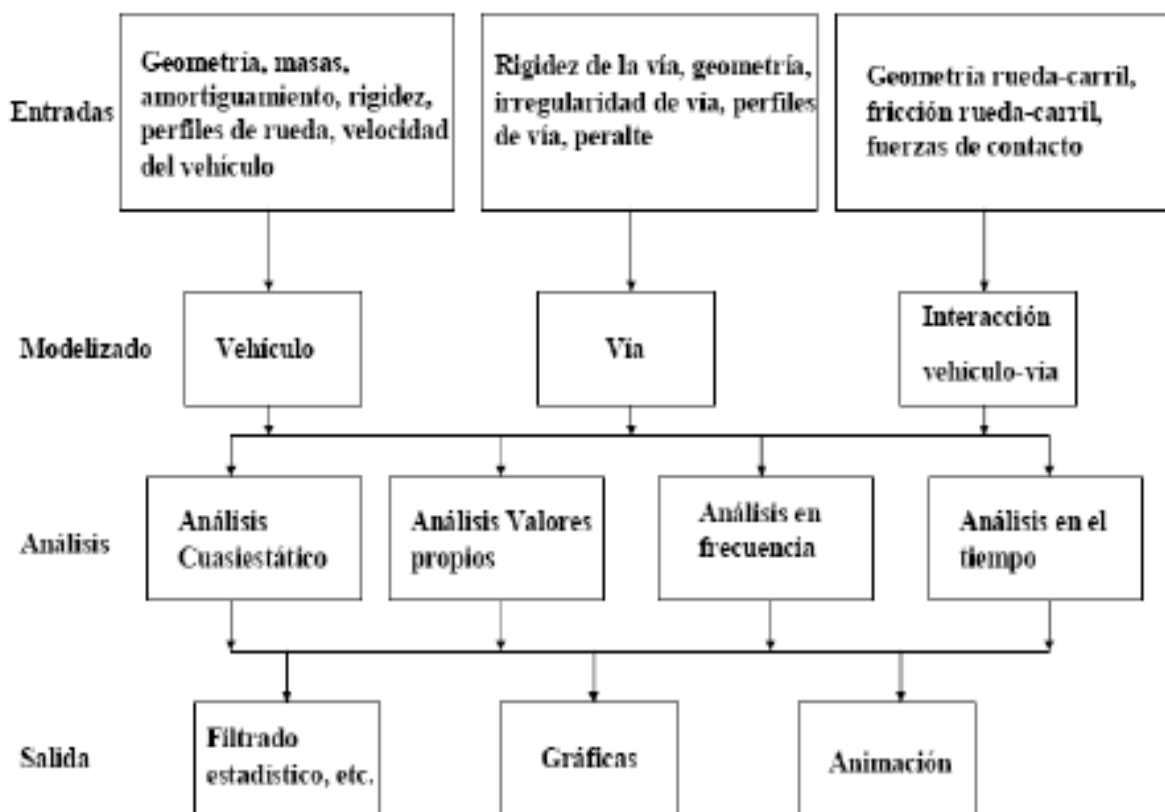
Se puede decir que la simulación computacional comenzó en la industria aeroespacial, mediante el uso de rutinas para calcular las vibraciones aeroelástica del ala de un avión. En 1962, se llevó a cabo el primer análisis de autovalores de un vehículo de dos ejes. Dicho análisis se llevó a cabo en una computadora de la English Electric Aviation, mediante el uso de rutinas típicas de la industria aeroespacial; ya que, las ecuaciones lineales del movimiento de un vehículo ferroviario son las mismas que las ecuaciones aeroelásticas del ala de un avión, siempre y cuando se realice una buena interpretación de la velocidad del vehículo.

Con el paso del tiempo y la creciente utilización de los ordenadores en la rama de la ingeniería, fue aumentando el interés por el uso de métodos numéricos, obteniendo librerías de rutinas estándar para la solución de los autovalores, así como la solución de las ecuaciones diferenciales necesarias. Por este motivo, a partir de la década de los 60 y 70, se empezaron a realizar simulaciones de modelos de vehículos no lineales complejos. Estas simulaciones se basaron en el uso de las ecuaciones del movimiento deducidas manualmente e incorporadas a programas computacionales.

Posteriormente las grandes empresas empezaron a diseñar paquetes completos que cubrían un gran rango de los cálculos dinámicos para un mismo modelo de vehículo. Por lo que, empezaron a aparecer una gran cantidad de programas de simulación que se pueden clasificar según su enfoque:

- Primer enfoque: Las ecuaciones eran elaboradas para la resolución de algunas configuraciones más o menos estándar, según su comportamiento esperado.
- Segundo enfoque: Permiten la simulación de diferentes modelos de vehículos en situaciones generales, obteniendo los denominados programas multicuerpo.

Actualmente, el proceso de simulación consta de manera general de cuatro pasos: Introducción de valores, modelizado, análisis y salida de resultados. Este proceso queda representado en la *figura 17*:



**Figura 17: Esquema de una simulación computacional**

El éxito en la simulación procede principalmente de la correcta modelización tanto de la vía como del vehículo, así como la entrada adecuada de los datos necesarios, con el objetivo de obtener los resultados buscados. En definitiva, hay que tener en cuenta una serie de factores, antes de determinar el programa de simulación adecuado:

- Propósito de las simulaciones, incluyendo parámetros de salida requeridos y su precisión.
- · Intervalo de frecuencia de interés.
- · Acceso a paquetes de simulación adecuados.
- · Acceso a importantes datos de los modelos.
- · Tiempo y financiación disponibles.

### **MSC. ADAMS RAIL**

Adams Rail versión 2005, es una parte de la suite del software MSC Adams, siendo un entorno especializado para la creación de un prototipo de tren virtual. Mediante Adams Rail se puede crear, catalogar, y analizar la dinámica de vehículos ferroviarios, permitiendo construir y modificar el modelo completo.

El software posee una base de datos que nos asegura la utilización de elementos normalizados. Nos permite crear rápidamente un vehículo ferroviario y analizarlo para comprender su funcionamiento y comportamiento gracias a la ayuda del generador de

plantillas, herramienta muy útil que utilizaremos para crear nuestro vehículo ferroviario, ya que nos basaremos en las plantillas del tren Avant serie S-104.

Como veremos en el capítulo VI en el cual llevaremos a cabo el cambio en las conicidades de las ruedas, el software nos permite alterar propiedades específicas, como pueden ser, de las suspensiones, de la geometría, etc. del modelo para evaluar los efectos de las alteraciones. De esta forma, permite observar el rendimiento de un diseño y refinarlo antes de construir y probar un prototipo físico.

Gracias a la capacidad que posee, el software permite ahorrar elevado tiempo y costes al no realizar múltiples ensayos sobre prototipos reales, ya que nos permite simular diversos tipos de eventos para desarrollar una prueba virtual completa del modelo.

Otras de las características de las que dispondremos con el software MSC. Adams Rail son:

- Permite variar el tipo de análisis más rápido y más fácilmente que con prototipo físico, el cual requeriría tener que modificar los instrumentos, accesorios y procedimientos del ensayo.
- Se puede trazar los resultados en gráficos o representarlos en una animación de alta velocidad.
- Permite estudiar, perfeccionar y optimizar el trazado de la vía.
- Es posible determinar la estabilidad del vehículo, la distancia de seguridad de descarrilamiento, la comodidad de los pasajeros, etcétera.
- Se puede detectar interferencias de componentes, desgaste excesivo, inestabilidad y limitaciones de rendimiento.
- Permite predecir con precisión la presión y las fuerzas del contacto rueda-raíl.
- Permite trabajar en un entorno más seguro sin el temor de perder los datos por fallo del instrumento.

Como hemos comentado el inicio del Proyecto Fin de Carrera, utilizaremos el software MSC. Adams Rail para la realización del modelado y simulación del vehículo ferroviario, así como el paquete Postprocessor, para la ilustración de los resultados.

A continuación, en los siguientes capítulos describiremos mas detalladamente el proceso para el modelado del vehículo y cambio de conicidad con MSC. Adams Rail.

## **4.2. MODOS DE USUARIOS**

Para empezar a utilizar el software Adams Rail hay antes que configurar el programa, pues existen dos modos de usuario, por defecto viene fijado el modo de usuario estándar, que es el que vamos a utilizar nosotros para el presente proyecto fin de carrera, mediante el cual no se van a poder crear componentes. Los dos modos de usuario disponibles son:

- **Standard user**

Sólo se tiene acceso al Standard Interface, donde el usuario va a poder crear nuevos modelos o patrones (templates); operando sólo al nivel de subsistemas donde se pueden variar algunos parámetros de diseño y las entradas par el análisis.

- **Expert user.**

Se va a tener acceso también al Template Builder, mediante el cual se van a poder abrir patrones o templates existentes y modificar sus parámetros o crear nuevos patrones. En este modo de usuario, al iniciar Adams Rail, se ofrece la posibilidad de seleccionar entre *Standard Interface* o *Template Builder*.

## 4.3. MODOS DE TRABAJO DISPONIBLES

Como hemos comentado en el punto anterior, el software Adams Rail, permite trabajar en dos tipos de entorno:

⇒ **Template Builder (Generador de Plantillas)**

Se usa para crear nuevas plantillas (*templates*), que posteriormente van a ser utilizados en el Interfaz Estándar cuando se las requiera. Las plantillas se pueden obtener a partir de los componentes estándar almacenados en la librería de Adams Rail.

⇒ **Standard Interface (Interfaz Estándar)**

Se usa para trabajar con plantillas ya existentes y utilizarlas para crear los subsistemas necesarios para crear un ensamblaje de tren completo, para posteriormente poder realizar las simulaciones oportunas.

Para poder realizar el cambio al modo usuario experto en MSC. Adams Rail, debemos modificar el archivo de configuración privado, *.acar.cfg* al cual accede al principio de cada sesión. Este archivo se puede editar mediante un editor de texto y modificar sus correspondientes líneas. Para cambiar al modo experto se debe modificar el valor del comando *MDI\_ACAR\_USERMODE* al valor *template\_builder*, como se muestra en la *figura 18*, parte del archivo de configuración privado.

```

! *****!
! ***          Car Database Configuration Info          ***!
! *****!
! Desired user mode (standard/template_builder)
ENVIRONMENT   MDI_ACAR_USERMODE           template_builder
ENVIRONMENT   MDI_ACAR_MODEPROMPT         yes

! Enable access to A/View interface
ENVIRONMENT   MDI_ACAR_PLUS_AVIEW         no

! Default side left/right - affects dboxes radio boxes and guesses
ENVIRONMENT   MDI_ACAR_SIDE_PREF          left

```

*Figura 18: Archivo de configuración.*

## 4.4. BASE DE DATOS

Existen dos bases de datos disponibles en Adams Rail:

### ⇒ Base de datos principal o compartida:

Es una carpeta que crea automáticamente Adams Rail llamada *shared\_rail\_database.cdb*, donde están almacenados archivos con contenido de distinto tipo, como por ejemplo el modelado de un vehículo estándar, archivos de propiedades de la vía, etc.

Uno de los archivos que se puede encontrar en la base de datos es un prototipo de tren denominado por Adams como *ERRI WAGON*. El término *ERRI* viene de las iniciales del Instituto Europeo de Investigación Ferroviaria (*European Rail Research Institute*). Este centro de investigación se creó a partir de la UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles), con motivo del desarrollo de un proyecto con el cual se pretendía la unificación en los sistemas de control, señalización y comunicación en todas las redes de ferrocarriles en Europa. En la actualidad este organismo ha cesado su trabajo. Este instituto creó un prototipo virtual de vehículo moderno de pasajeros para que se realizaran análisis mediante ordenadores y programas de simulación. Cada vagón del *ERRI WAGON* está compuesto por un bogie delantero, un bogie trasero y un cuerpo o caja situado sobre dichos bogies [6].

### ⇒ Base de datos particular:

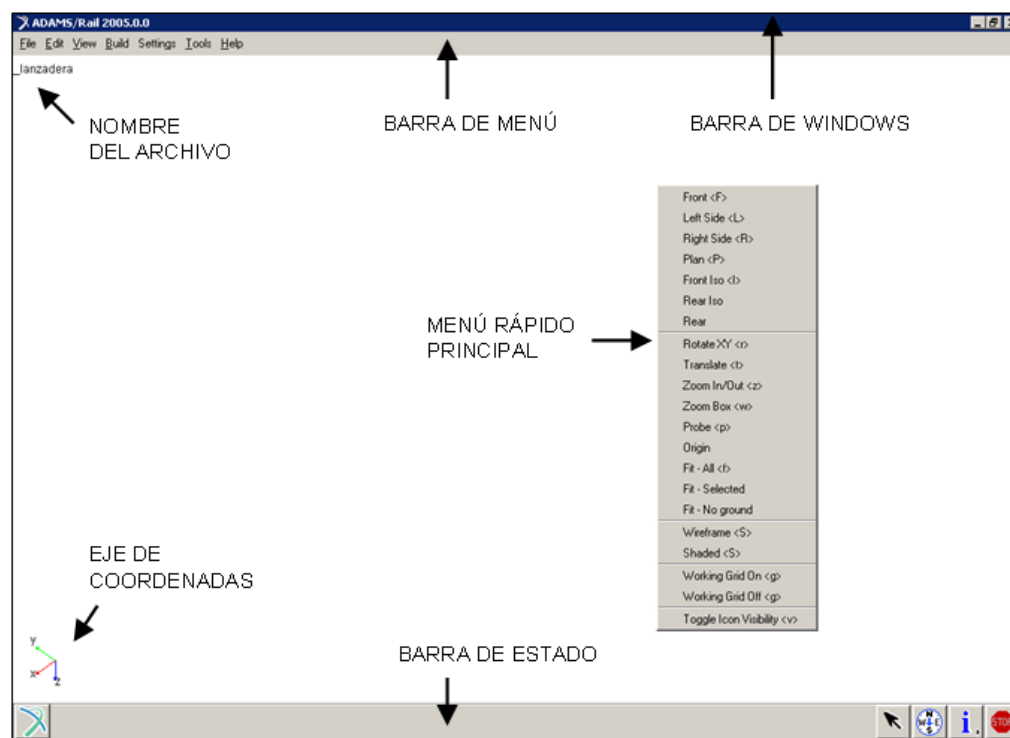
Es la carpeta donde se almacenan todos los archivos que se necesita crear para realizar una simulación, cuyo nombre es *private.cdb*. Está vacía al principio y está estructurada de la misma forma que la base de datos principal. Se puede partir del contenido de la base principal para crear, a partir de ellos, parte de la base de datos particular.

## 4.5. INTERFAZ DE USUARIO

El entorno gráfico de Adams Rail dispone de los siguientes menús e indicaciones:

- ⇒ **Barra de windows (*windows bar*):** es la ventana gráfica de Adams Rail.
- ⇒ **Barra de menú (*menu bar*):** esta barra dispone de todas las herramientas y opciones necesarias para trabajar en Adams Rail. Dependiendo de con qué modo se esté trabajando, esta barra muestra diferentes opciones:
  - **Generador de plantillas (*Template Builder*):** *File, Edit, View, Build, Settings, Tools y Help.*
  - **Interfaz Estándar (*Standard Interface*):** *File, Edit, View, Adjust, Simulate, Review, Settings, Tools y Help.*
- ⇒ **Menú rápido principal (*main shortcut menu*):** permite realizar opciones visuales en la presentación, como realizar diferentes vistas, hacer zoom, sombreados, etc.
- ⇒ **Barra de estado (*status bar*):** indica la acción que se va a ejecutar.
- ⇒ **Eje de coordenadas (*view triad*):** indica la orientación de los ejes de coordenadas.
- ⇒ **Nombre del archivo:** se indicará arriba a la izquierda de la ventana gráfica de Adams Rail.

En la siguiente *figura 19* podemos observar el entorno de trabajo en el software MSC. Adams Rail.



**Figura 19: Interfaz de usuario.**

## 4.6. PROPIEDADES DEL MODELADO DEL VEHÍCULO

Antes de diseñar cualquier vehículo o parte del vehículo debemos conocer las propiedades del modelado con las que trabaja el software MSC. Adams Rail.

### 4.6.1. MASA DEL TREN

Está localizada, en su amplia mayoría, en el chasis del vagón. No obstante, en condiciones normales de funcionamiento, se deberían tener en cuenta otras cargas añadidas como son los pasajeros, la mercancía, el combustible, etc.

En la mayoría de los casos es muy difícil conocer la masa de cada uno de los elementos que componen el vehículo ferroviario, así como su posición, por lo que se toma la masa de manera general como la fusión de las masas de cada uno de los elementos.

### 4.6.2. FLEXIBILIDAD DEL VAGÓN

Es un factor importante en cuanto al estudio de vibraciones y al análisis del confort. Por este motivo, y debido a la imposibilidad de modelar un vagón flexible, el modelo de estudio está dividido en dos cuerpos conectados mediante un elemento de torsión, intentando modelar de esta manera la flexibilidad del vagón.

#### Posición de los ejes de coordenada

El sistema de referencias con el que trabaja Adams Rail:

- ⇒ Z positivo hacia abajo.
- ⇒ X positivo en el sentido de la marcha.
- ⇒ Y será consecuencia de la dirección del eje Z y del X.

Al comenzar un nuevo modelado, primero se introducen los datos del eje calado y en ese momento el programa toma el origen en el centro del eje. Cuando se han introducido los dos ejes calados, el programa ya toma el origen 0,0,0, en el centro de los dos ejes.

También es importante decir que Adams Rail expresa por defecto las respuestas del contacto en el sistema de referencia de los raíles, que tiene la orientación que se muestra en la *figura 20*.

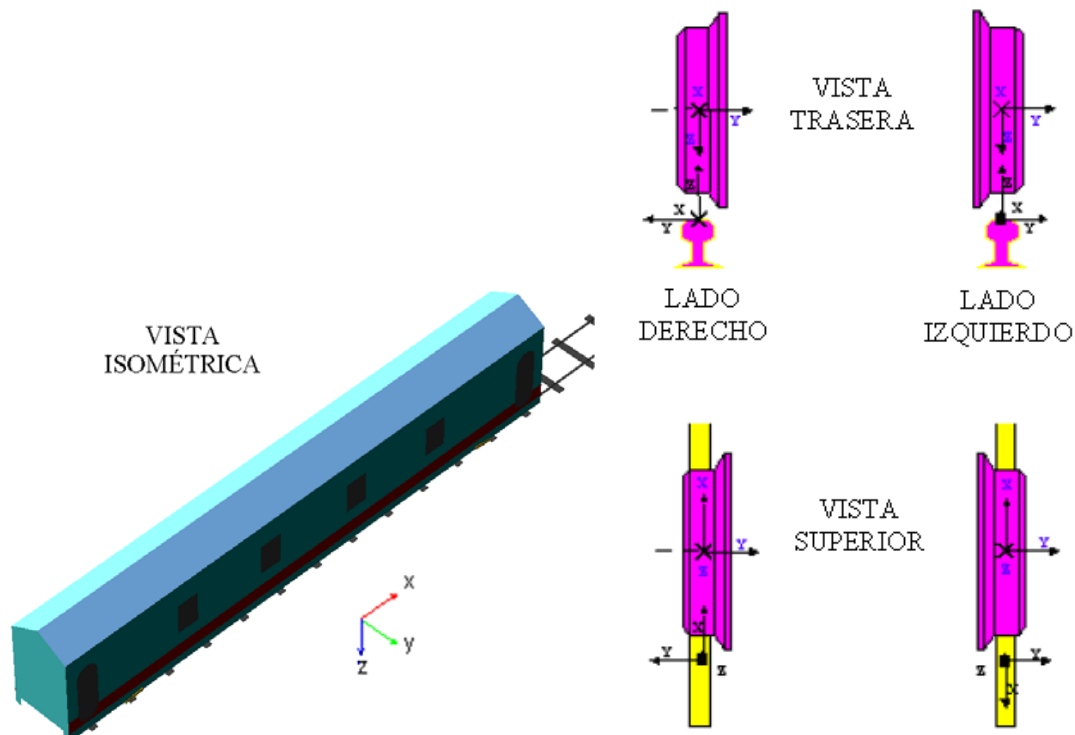


Figura 20: Eje de coordenadas del carril y de la rueda

## 4.7. TIPOS DE ANÁLISIS

Tras realizar el ensamblado del vehículo completo mediante el modo Interfaz Estándar, Adams Rail permite realizar diferentes análisis de cálculo. Los principales análisis que se pueden llevar a cabo con el programa son:

➤ **Análisis de precarga (*preload analysis*)**

Este análisis calcula las fuerzas de precarga en la suspensión del vehículo. Se utiliza el cálculo de las fuerzas de precarga para asegurarse de que la configuración del modelo de vehículo, después de la ejecución del análisis estático, es igual a la configuración de diseño. Adams Rail calcula las fuerzas de precarga de acuerdo con la distribución de las masas del vehículo y automáticamente las aplica a las suspensiones.

➤ **Análisis lineal (*linear analysis*)**

Todo sistema con masa y rigidez puede vibrar, por lo que a partir de un análisis lineal se pueden obtener los autovalores, los modos propios de vibración y las frecuencias naturales a las que se producen. Aunque de forma general las ecuaciones que determinan la respuesta dinámica no son excesivamente lineales, se puede llevar a cabo un análisis lineal para determinar las frecuencias modales y los modos de vibración. Para ello, el programa restringe el movimiento de los ejes calados y las ruedas con respecto a tierra mediante uniones fijas.



➤ **Análisis dinámico (*dynamic analysis*)**

Este análisis sirve para estudiar el comportamiento del vagón en movimiento. Se puede calcular el nivel de confort, las posibles causas de descarrilamiento y el comportamiento del vehículo al paso por curva, en función de la vía, la velocidad y del tipo de contacto utilizado.

➤ **Análisis de estabilidad (*stability analysis*)**

Permite estudiar la estabilidad del ensamblaje, mediante análisis para diferentes velocidades y configuraciones del contacto rueda-raíl. Esta información puede ser utilizada para determinar la velocidad crítica del vehículo.



# **Capítulo 5**

## **Modelado Tren Avant serie S-104**



## 5.1. PROCEDIMIENTO GENÉRICO DE MODELIZACIÓN.

Para crear un modelo en Adams Rail, se debe definir los diferentes componentes que lo constituyen, es decir, los bogies (compuestos a su vez por el conjunto de ruedas, las suspensiones, amortiguadores, etc) y los vagones del ferrocarril. Dicho modelo puede ser creado por el propio usuario, usando el modo de creación de plantillas, o se pueden utilizar las plantillas predefinidas por el programa, facilitando de esta manera el uso de este software.

Los pasos que se debe seguir en Adams Rail para realizar el correcto modelado de un vehículo ferroviario y la posterior simulación son los siguientes:

### ➤ **PASO 1:**

Empleando el Generador de Plantillas se crearán las plantillas (*templates*) de los diferentes componentes que constituyen el modelo, introduciendo los parámetros requeridos y referenciando los archivo de propiedades (*property file*) que lo definen. Se crearán:

- **Plantilla bogie:** se creará un bogie introduciendo cada uno de los componentes que lo definen, es decir, eje calado, bastidor, sistema de suspensión, etc.
- **Plantilla carrocería:** se creará el chasis del vagón

### ➤ **PASO 2:**

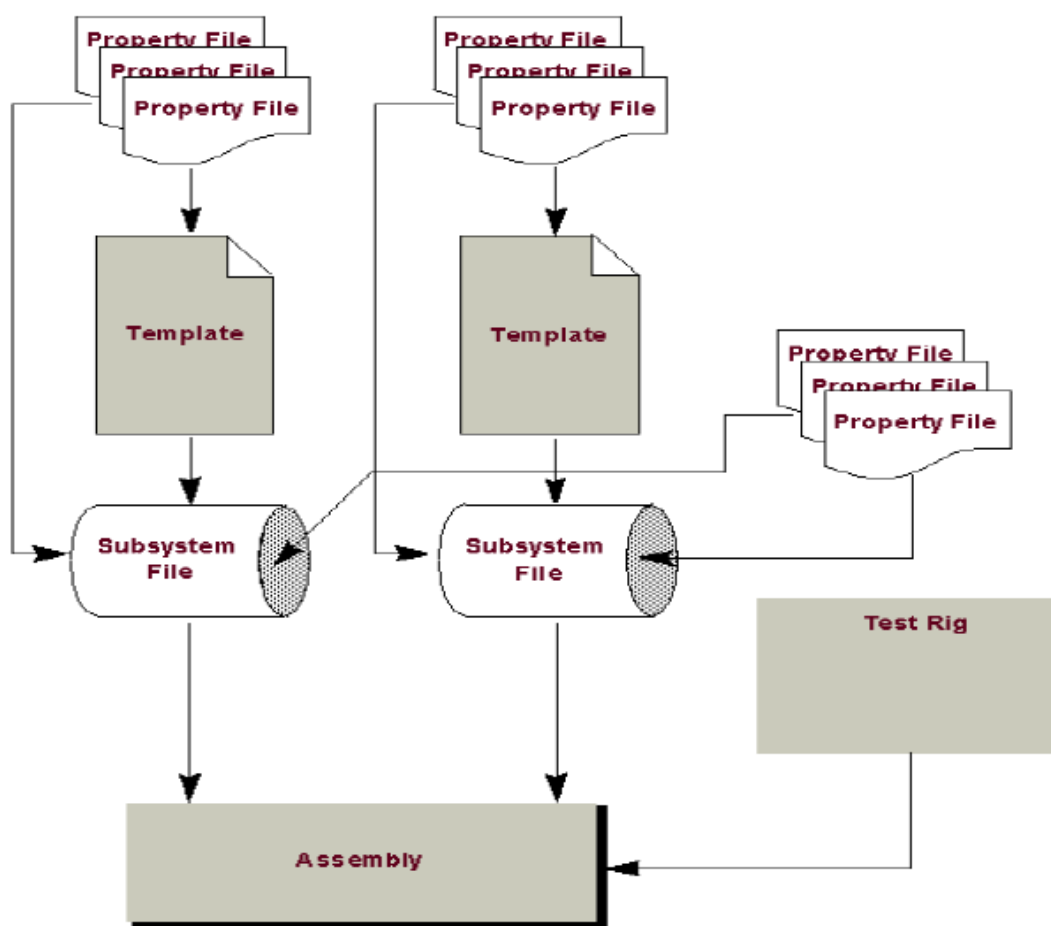
Empleando el Interfaz Estándar se crearán los subsistemas (*subsystem*), empleando como referencia los archivos creados y almacenados como plantillas. A nivel de un subsistema, se van a poder aún modificar algunos parámetros e introducir archivos de propiedades. Se crearán:

- **Subsistema bogie frontal:** toma como referencia la plantilla del bogie creado.
- **Subsistema bogie trasero:** toma como referencia la plantilla del bogie creado. Se modificarán ciertos parámetros a nivel de subsistema para ser adaptada a la parte trasera del vagón.
- **Subsistema carrocería:** toma como referencia la plantilla de la carrocería.

➤ **PASO 3:**

Empleando el Interfaz Estándar se hará el montaje (*assembly*) enlazando los subsistemas anteriormente creados. Para realizar el ensamblaje será necesario un banco de pruebas (*test rig*) que contiene los elementos de accionamiento que proporcionan los movimientos o fuerzas que excitan el ensamblaje. Una vez obtenido el ensamblado, se podrán realizar los análisis dinámico, precarga, lineal, estabilidad, etc. en multitud de simulaciones diferentes. Los archivos de propiedades de la vía y de contacto rueda-raíl se introducirán una vez realizado el ensamblado, para realizar la simulación deseada.

En la *figura 22*, se muestra un esquema donde se aprecia cuales los pasos a seguir en la definición o montaje de un vehículo generalizado en Adams Rail.



*Figura 21: Pasos a seguir para la creación de un modelo en Adams Rail.*

## 5.2. CREACIÓN DE UN SUBSISTEMA DE BOGIE FRONTAL

En el siguiente apartado se tratará de dar una visión general sobre los pasos a llevar a cabo para analizar un conjunto de un vehículo ferroviario y, a continuación, realizar un análisis del modelo.

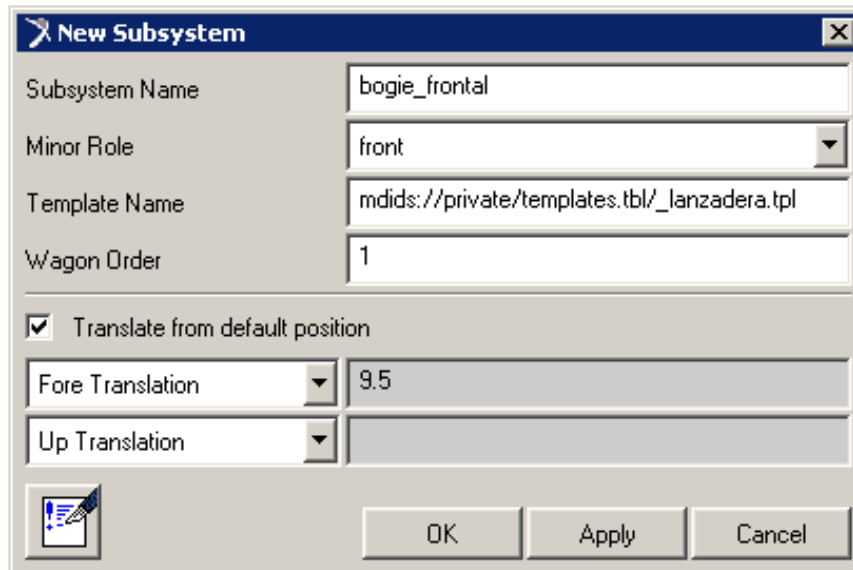
Partiendo de la plantilla creada en el apartado anterior, se utilizará Adams Rail en modo Interfaz Estándar para crear los subsistemas de la parte delantera y trasera del bogie y el subsistema carrocería. Después ya se puede realizar en ensamblaje para poder realizar los análisis que se deseados.

Para crear un subsistema de bogie frontal usando la plantilla *lanzadera.tpl* que se ha creado en los pasos anteriores, en la barra de menú se selecciona los comandos *File, New, Subsystem* y se completa el cuadro emergente:

- ⇒ **Subsystem name:** nombre del subsistema frontal, en este caso *bogie\_frontal*.
- ⇒ **Minor role:** en este caso será frontal, *front*.
- ⇒ **Template name:** nombre de la plantilla creada en la que se basará el subsistema, en este caso *lanzadera.tpl*.
- ⇒ **Wagon order:** indica el orden del vagón para poder obtener con la misma plantilla más vagones en el ensamble. En este caso *1*.
- ⇒ **Translate from default position:** es el desplazamiento desde la posición por defecto del modelo. Se marca esta casilla para el bogie frontal.
- ⇒ **Fore translate:** es el desplazamiento delantero en posición X. En este caso *9,5*.

Se desplaza 9,5 m hacia delante el bogie delantero y 9,5 m hacia atrás el trasero, ya que el origen de coordenadas estará en el centro del vagón. De esta forma se situarán los bogies en su lugar correspondiente con respecto al vagón. Después de crear el subsistema, se guarda en la base de datos Adams Rail.

En la *figura 23* se muestra el menú al crear un nuevo subsistema en Adams Rail.



*Figura 22: Menú para crear un subsistema.*

### 5.3. CÓMO CREAR UN SUBSISTEMA DE BOGIE TRASERO

Se realizan los mismos pasos que en el bogie delantero, modificando lo siguiente:

- ⇒ **Subsystem name:** nombre del subsistema trasero *bogie\_trasero*.
- ⇒ **Minor role:** *rear*.
- ⇒ **Aft translate:** en este caso marcamos que el desplazamiento sea hacia atrás. Será 9,5.

Para el bogie trasero hay que girar los dos amortiguadores anti-desvío (*anti-yaw*) del bogie trasero moviendo el punto de anclaje.

#### Para modificar los puntos de unión:

En la barra de menú se selecciona los comandos *Adjust*, *Hardpoint*, *Modify* y en el cuadro que aparece se introduce:

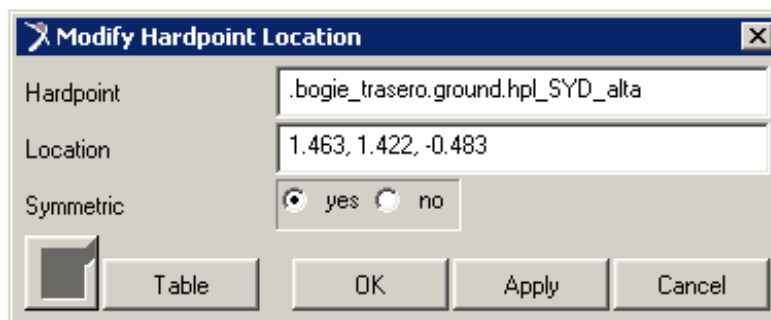
- ⇒ **Hardpoint:** se selecciona el punto de unión creado para el amortiguador anti-desvío trasero, es decir *hpl\_SYD\_alta*.
- ⇒ **Location:** se marca esta nueva posición para ajustar el modelo de subsistema creado a partir de una misma plantilla a un bogie que irá colocado en la parte trasera del vagón. Se introduce *1.463, -1.422, -0.483*.
- ⇒ **Symmetric:** se selecciona que hay simetría, es decir *yes*.

Nuevamente se repite la operación con estos cambios:



- ⇒ **Hardpoint:** *hpl\_SYD\_baja*.
- ⇒ **Location:** 2.354, -1.422, -0.601.
- ⇒ **Symmetric:** *yes*.

En la *figura 24* se muestra el menú emergente que aparece al modificar la localización de un hardpoint en Adams Rail.



**Figura 23:** Menú para modificar un punto de unión.

Después de crear el subsistema, se guardará en la base de datos propia de Adams Rail para después usarlo.

## 5.4. CÓMO CREAR UN SUBSISTEMA DE CARROCERÍA

Se debe crear un subsistema de carrocería basándose en la plantilla creada para la misma, llamada *vagon.tpl*.

Para realizar el subsistema, se siguen los mismos pasos descritos anteriormente. Se selecciona en la barra de menú los comandos *File, New, Subsystem* y se completa el cuadro emergente con los siguientes parámetros:

- ⇒ **Subsystem Name:** *sub\_vagon*.
- ⇒ **Minor Role:** *Any*.
- ⇒ **Template Name:** *vagon.tpl*.
- ⇒ **Wagon Order:** *1*.
- ⇒ **Translate from default position:** no se marca.

## 5.5. CÓMO CREAR UN ENSAMBLE DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO COMPLETO

Adams Rail permite agrupar subsistemas por separado en un ensamblado (*assembly*). Los montajes se componen de un conjunto de subsistemas junto a un *test rig*, los cuales cuando son ensamblados forman un sistema dispuesto para poder ser analizado. Esta agrupación simplifica la apertura y el ahorro de subsistemas.

Se debe crear un conjunto completo de ferrocarril que contenga lo siguiente:

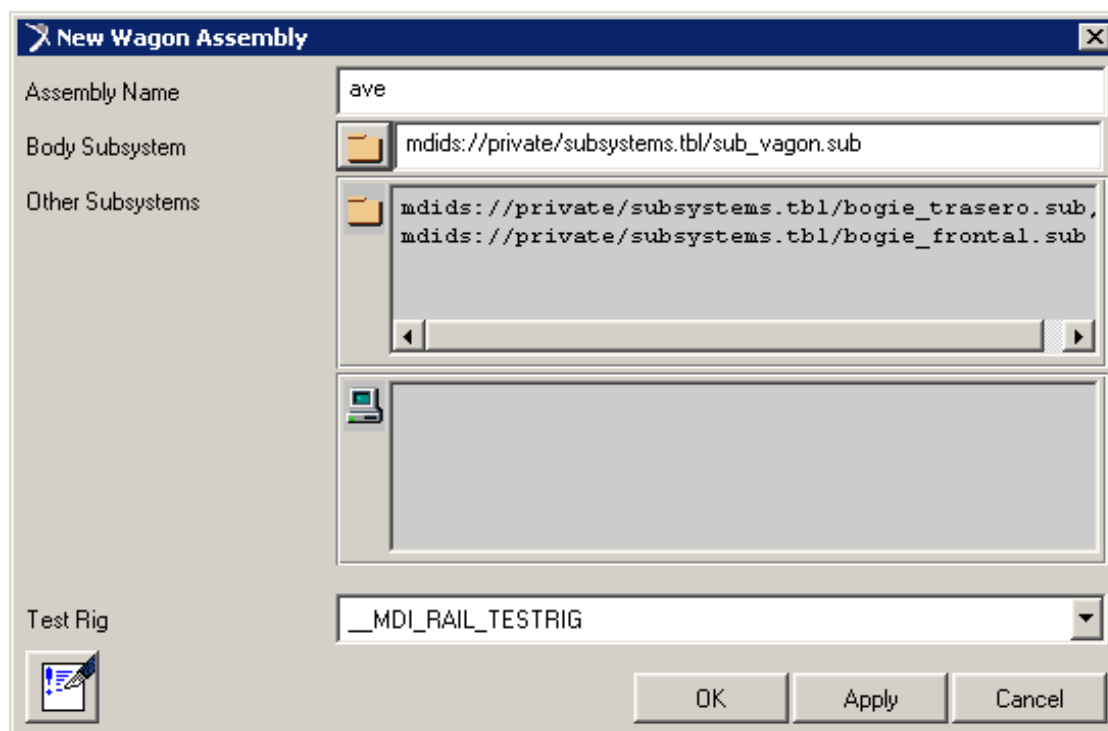
- ⇒ Bogie delantero y trasero.
- ⇒ Carrocería (cuerpo).

### Para crear un conjunto completo de un vehículo:

En la barra de menú se seleccionan los comandos *File*, *New*, *Wagon Assembly* y se completa el cuadro con los siguientes parámetros:

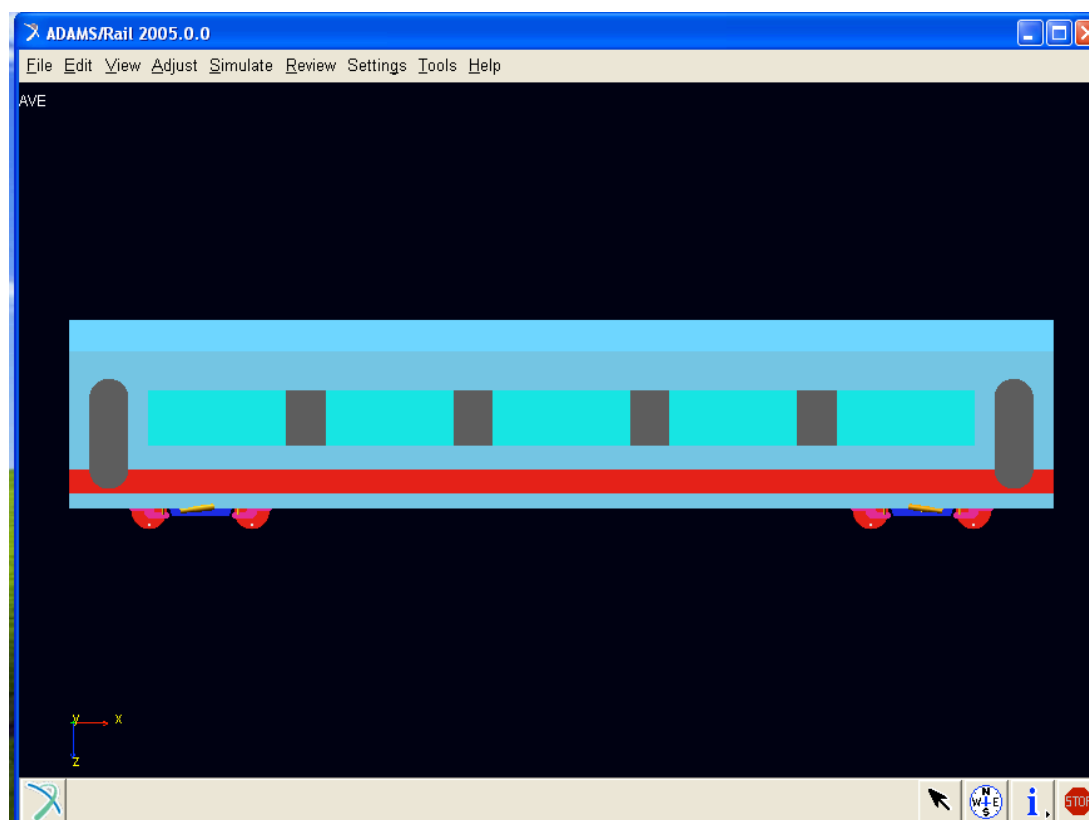
- ⇒ **Assembly Name:** nombre que se desee, en este caso *AVE*.
- ⇒ **Body Subsystem:** nombre del subsistema de carrocería creado, en este caso *sub\_vagon.sub*.
- ⇒ **Other subsystems:** se selecciona de la base de datos privada los subsistemas creados para los bogies delantero y trasero, en este caso *bogie\_frontal.sub* y *bogie\_trasero.sub*.
- ⇒ **Test Rig:** se selecciona un banco de pruebas o dispositivo de ensayo que contiene todos los marcos de referencia y contacto de la rueda con elementos de la fuerza que Adams Rail luego usa para el análisis. Se selecciona *MDI\_RAIL\_TESTRIG*.

En la *figura 25* se muestra el menú emergente que aparece al crear un ensamblaje en Adams Rail.

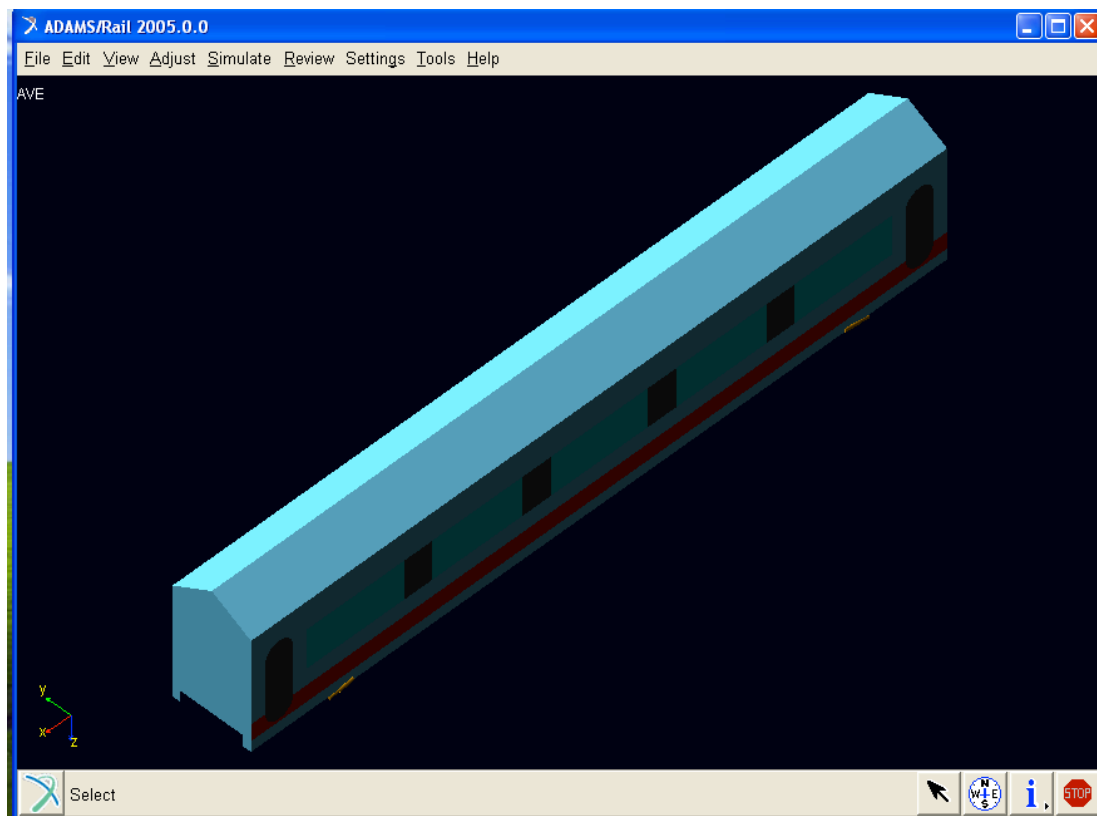


**Figura 24: Menú para crear un nuevo ensamblaje.**

Adams Rail muestra el conjunto completo de ferrocarril en la ventana principal, como se muestra en las siguientes figuras 26 y 27.



**Figura 25: Plantilla de un ensamblaje (vista lateral).**



**Figura 26: Plantilla de un ensamblaje (vista ISO).**

Al guardar este montaje, se almacenará en la base de datos *private.cdb*, dentro de la carpeta *assemblies.tbl* y con el nombre que se le de al archivo. Una vez hemos obtenido el vehículo ferroviario, sólo nos queda cambiar la conicidad de sus ruedas para poder realizar los análisis.

# Capítulo 6

## Procedimiento para el cambio de conicidad



## 6.1 INTRODUCCIÓN

La geometría del contacto rueda-carril constituye un elemento clave en la resolución de la dinámica de un vehículo ferroviario. Es bien sabido que la forma con la que se diseña tanto el perfil de la rueda en la zona de rodadura así como la cabeza del carril condiciona fuertemente la respuesta del vehículo desde el punto de vista de diversos factores, como son la estabilidad, ausencia de vibraciones, la capacidad de inscripción en curva, el desgaste de ruedas y carriles y la seguridad de rodadura entre otros [22-23]. Es por ello que surge la necesidad de obtener unos perfiles lo más idóneos en la medida de lo posible para las condiciones de circulación previstas. De este modo se consigue una respuesta dinámica mejorada, aumentando por ejemplo la estabilidad del vehículo, o bien reduciendo el desgaste de los perfiles y las fuerzas transmitidas a la vía en tramos curvos.

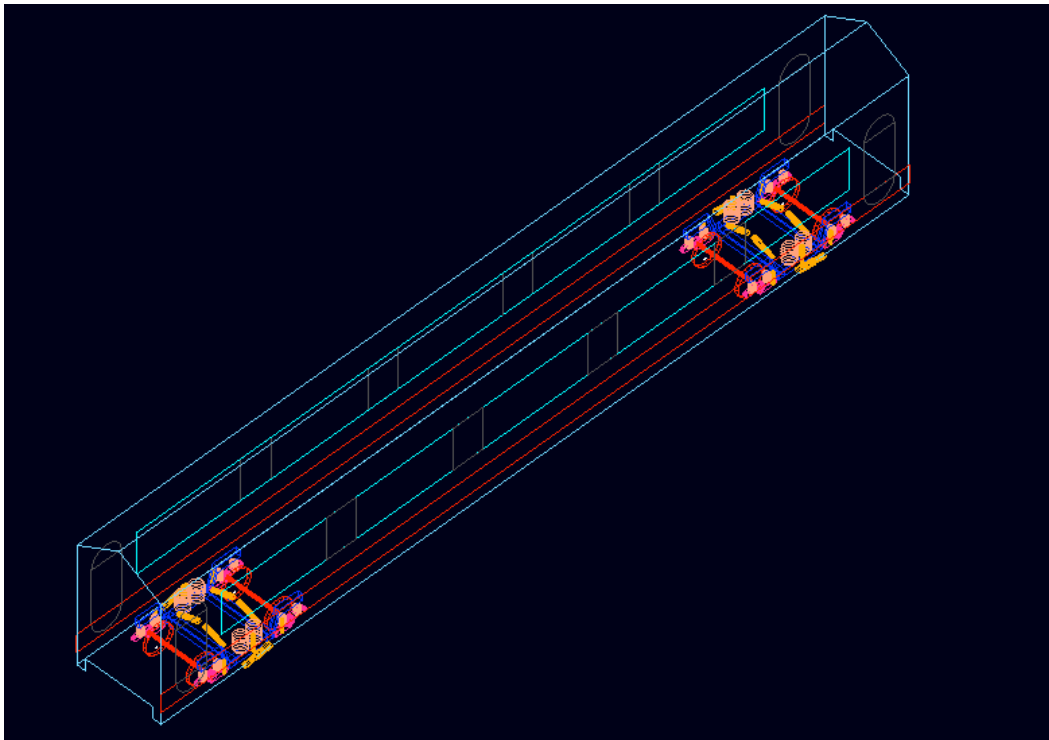
Tradicionalmente los perfiles de rueda se han obtenido en base a la experiencia e intuición del diseñador, teniendo en cuenta el tipo de carril sobre el que iban a entrar en contacto, así como las características del vehículo y de la vía. No es una tarea sencilla ya que la sensibilidad de la dinámica del vehículo a la geometría de los perfiles es muy alta, y un mismo perfil de rueda puede mostrar un buen comportamiento para un vehículo o vía determinada, y sin embargo ofrecer una mala respuesta cuando se cambia alguna condición de circulación. Existe además otro factor que hace particularmente complicado el proceso de obtención de un perfil optimizado:

El desgaste inevitable que se producirá sobre el propio perfil como consecuencia de la rodadura en los primeros miles de kilómetros de circulación. El desgaste no sólo es perjudicial desde el punto de vista económico (se elimina material y es necesario retornear o sustituir periódicamente las ruedas, por lo que siempre se trata de minimizar ese desgaste en todos los casos); también hace cambiar la forma del perfil inicialmente obtenido [23].

Esto conduce en mayor o menor medida a la pérdida de las características dinámicas del contacto rueda-carril que se han tratado de implantar en la fase de diseño inicial del perfil. Si el desgaste de la rueda se producirá rápidamente, el perfil obtenido en la fase de diseño y que ofrecía buenas prestaciones sólo podrá aprovecharse un corto periodo de tiempo, por lo que en realidad no será un buen diseño .

## 6.2 CONCEPTOS GENERALES

Una vez que hemos creado el vehículo ferroviario como se muestra en la siguiente figura, vamos a describir el procedimiento que hay que llevar a cabo para realizar el cambio de conicidad de sus ruedas, pero antes de eso vamos a describir conceptos generales y teoría necesaria para el cálculo de la conicidad, los archivos que define las propiedades de nuestras ruedas, así como también, los archivos que describen el trazado de la vía y el del contacto rueda-carril.

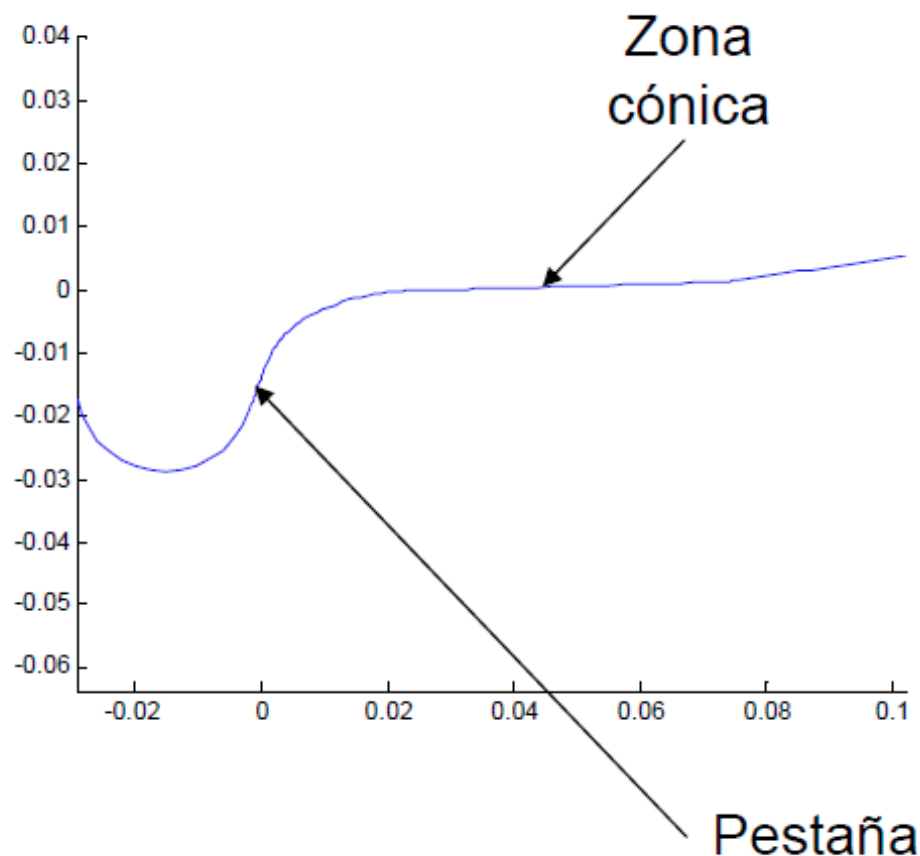


*Figura 27: Modelo tren Avant serie S-104*

### 6.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

El perfil de las ruedas que se emplean en los trenes es cónico, es decir, que según el punto de contacto entre la rueda y el carril, el diámetro con el que gira la rueda es distinto. En la *figura 29* se puede observar la zona cónica y el comienzo de la pestaña en este perfil cónico.

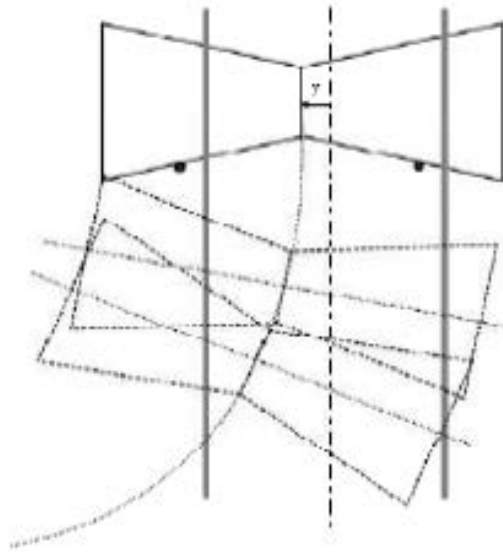




**Figura 28: Perfil de rueda**

La geometría de la rueda tiene gran importancia en los vehículos ferroviarios, un desplazamiento mínimo lateral del rodal implicará un cambio en el radio de la rueda, y por consiguiente, en su velocidad angular puesto que depende de la velocidad del tren y del radio de la rueda. Por tanto, un desplazamiento lateral en el que la pestaña se acerca al raíl, implica un radio mayor, mientras que si la pestaña se aleja del raíl, el radio disminuirá. Por razones de desgaste y geometría, las ruedas no se sitúan siempre sobre el mismo punto de contacto, sino que los radios de giro son por norma general diferentes en dos ruedas situadas en un mismo eje o rodal. Esta última idea se presenta problemática en el caso de tener ejes rígidos, en los que las ruedas están obligadas a girar a la misma velocidad.

En este segundo caso con ejes, la rueda que tiene un radio mayor intenta avanzar más deprisa que la que tiene el radio menor. Como ambas han de girar a la misma velocidad angular, esta diferencia de radio se traduce en un movimiento del eje como consecuencia de un par de giro respecto al eje vertical. Este movimiento se conoce como “movimiento de lazo” y es característico de los trenes que emplean ejes. El movimiento de lazo es amortiguado por la suspensión del tren, pero puede llegar a percibirse por los pasajeros y ser bastante problemático. Esto se esquematiza en la *figura 30*. En trenes con ruedas independientes, este movimiento nunca podría darse porque cada rueda puede girar independientemente de la otra.



*Figura 29: Movimiento de lazo esquematizado.*

## 6.2.2 ARCHIVO DE PROPIEDADES

Para definir las características de la vía, los contactos rueda-raíl, las suspensiones, los amortiguadores, etc., Adams Rail hace referencia a archivos de propiedades (*property files*) donde vienen definidas las características necesarias para una correcta simulación.

Los archivos de propiedades se basan en ASCII y pueden ser creado y modificados mediante cualquier editor de texto, y se utilizan para:

- ⇒ Aplicar las mismas características o parámetros para muchos componentes dentro de una plantilla o subsistema.
- ⇒ Compartir un componente entre diferentes plantillas y subsistemas.

Es necesario conocer con qué parámetros podemos jugar para realizar una correcta simulación. A continuación se describirán algunas de estos archivos para profundizar más en el tema.

### 6.2.2.1 Configurar y propiedades del trazado de una vía

En Adams Rail las características de la vía se van a definir mediante los archivos de propiedades de la vía (*track property file*). Estos archivos definirán parámetros de la vía como por ejemplo: la longitud, el ancho, la curvatura, las irregularidades, etc. Cada vez que se quiera realizar un análisis dinámico del modelo, debe especificarse un archivo de propiedades de la vía.

Van a poder ser obtenidos de una forma directa, abriendo los que ya hay almacenados en la librería de Adams Rail mediante un editor de texto y modificando o sobrescribiendo la información contenida en ellos. Todos los archivos de propiedades de la vía que se generen, se van a almacenar en la base de datos *private.cdb* dentro de la carpeta *tracks.tbl* y con la extensión (*.trk*).

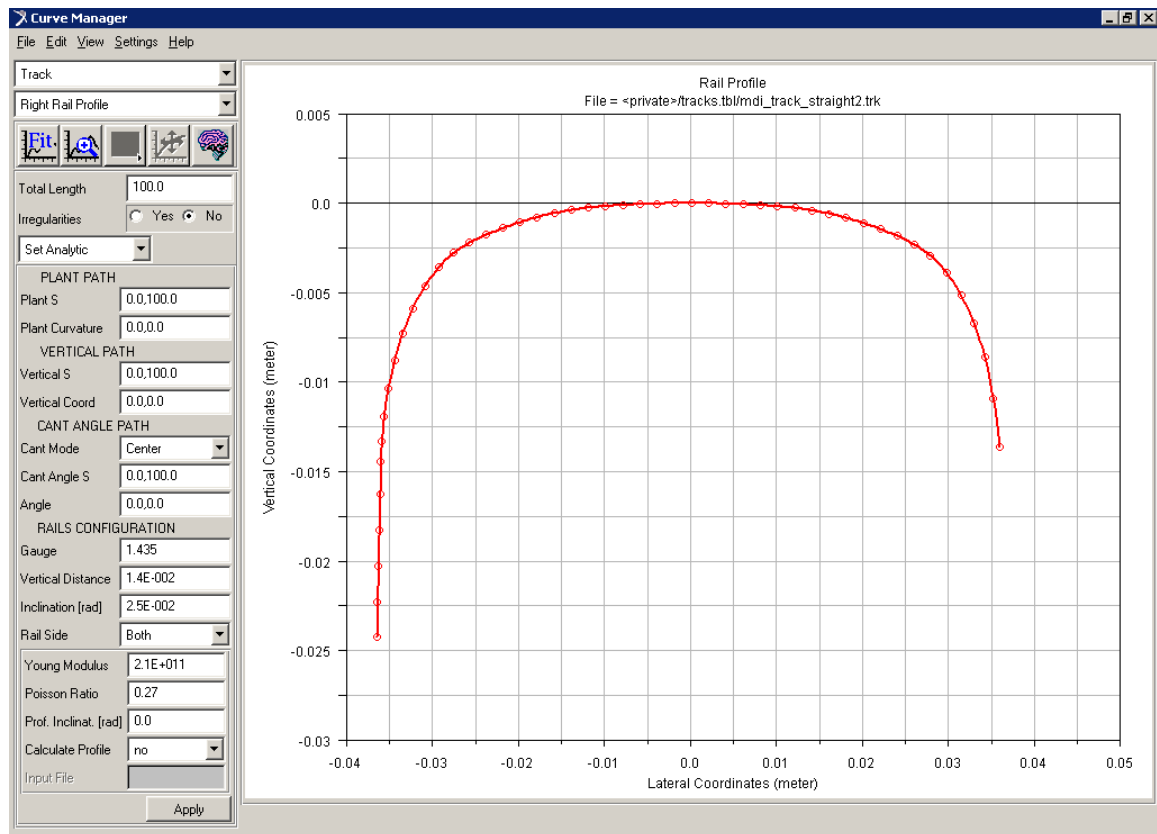
Los bloques en los que se estructura, de manera general, un archivo de propiedades de la vía son los siguientes [24]:

- ⇒ **MDI\_HEADER**: información genérica sobre el archivo de propiedades de la vía.
- ⇒ **UNITS**: unidades usadas para los parámetros de la vía (sólo unidades del Sistema Internacional).
- ⇒ **MODEL**: modelo y formato usado para la descripción de la vía.
- ⇒ **GLOBAL**: Parámetros generales de descripción de la vía, donde aparecen estos datos:
  - **TOTAL\_LENGTH**: especifica la longitud total de la vía. Cuando se excede la longitud de la vía durante el análisis dinámico, la simulación se para.
  - **CANT\_MODE**: especifica de qué manera se aplica un cierto ángulo de inclinación o peralte a la vía.
  - **IRREGULARITIES**: especifica si la vía contiene irregularidades o no. (YES/NO). Si hay algún tipo de irregularidades, hay que introducir otro bloque en el que se describan éstas mediante sus correspondientes parámetros, que será explicado en el apartado correspondiente.
- ⇒ **PLAN\_PATH**: descripción analítica de la vía en el plano horizontal, especificando para cada tramo de la vía la abscisa inicial y final, y la curvatura inicial y final.
- ⇒ **VERTICAL\_PATH**: descripción analítica de la vía en el plano vertical, especificando para cada tramo de la vía la abscisa inicial y final, y la altura inicial y final.
- ⇒ **CANT\_ANGLE\_PATH**: descripción analítica de la inclinación o peralte de la vía. Se describe la disposición de la vía en cuanto a su inclinación (*roll*), especificando para cada tramo de la vía, la abscisa inicial y final, y el ángulo de inclinación o peralte inicial y final, en radianes.
- ⇒ **RAILS\_CONFIGURATION**: Descripción de la disposición de los raíles a lo largo de la vía. Para cada tramo de la vía se especifican los siguientes parámetros:
  - **Track\_s**: abscisa de la vía.
  - **Gauge**: distancia nominal entre los raíles.

- **Vertical distance gauge (Vdg):** distancia vertical desde lo alto o cima del perfil al punto en el que la distancia nominal entre raíles (*gauge*) va a ser medida. *Vdg* y *gauge* juntos van a especificar la distancia real entre raíles.
  - **Inc[rad]:** inclinación del perfil del raíl con respecto a la vía.
  - **Rail\_id:** identificador del perfil del raíl.
- ⇒ **RAIL\_nL\_PROPERTIES:** inclinación del perfil para la sección 'n' del raíl izquierdo.
- ⇒ **RAIL\_nR\_PROPERTIES:** inclinación del perfil para la sección 'n' del raíl derecho.
- ⇒ **RAIL\_nL\_MATERIAL:** propiedades del material para la sección 'n' del raíl izquierdo.
- ⇒ **RAIL\_nR\_MATERIAL:** propiedades del material para la sección 'n' del raíl derecho.
- ⇒ **RAIL\_nL\_PROFILE\_XC1C2, RAIL\_nL\_PROFILE\_C3C4:** descripción del perfil del raíl izquierdo para la sección n-ésima.
- ⇒ **RAIL\_nR\_PROFILE\_XC1C2, RAIL\_nR\_PROFILE\_C3C4:** descripción del perfil del raíl derecho para la sección n-ésima.

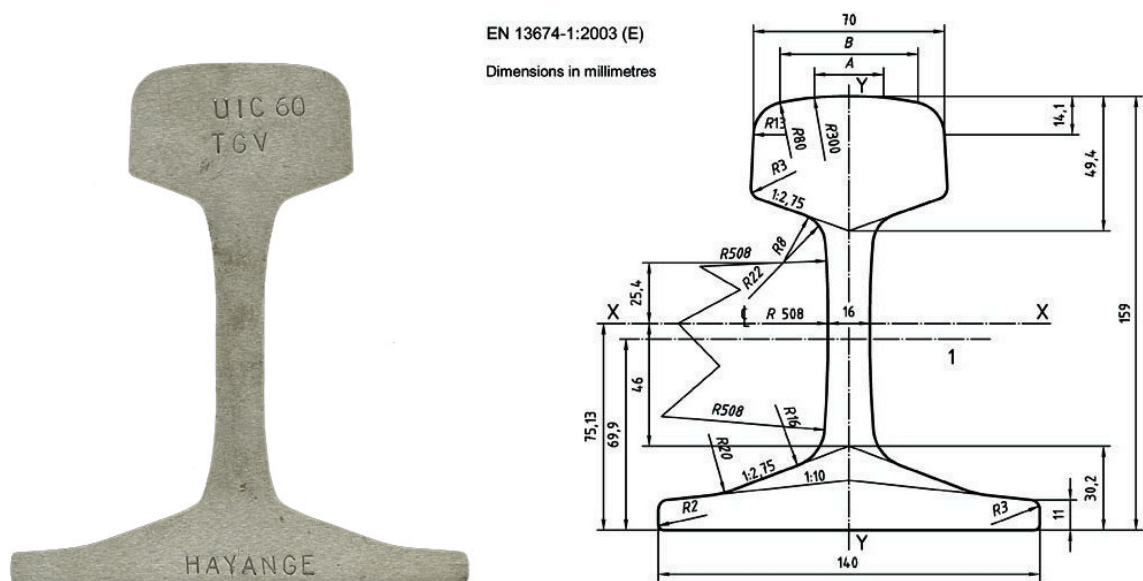
Donde *X* es la coordenada lateral del perfil del raíl, *C1C2* son los dos primeros coeficientes del spline del perfil y *C3C4* son los dos últimos coeficientes del spline del perfil.

Se puede abrir el archivo de propiedades de la vía seleccionando en la barra de menú los comandos *Tools, Curve Manager*. Se abrirá entonces la ventana de *Curve Manager*, donde se va a poder observar como quedan fijados los parámetros que definen la vía. En la *figura 31* se muestra el perfil del raíl.



**Figura 30: Representación del perfil del rail UIC 60 con Curve Manager.**

Para la realización del presente proyecto, se va a utilizar el perfil un perfil de rail UIC 60 como el representado en la *figura 31*.



**Figura 31: Riel estándar 860 UIC 60**

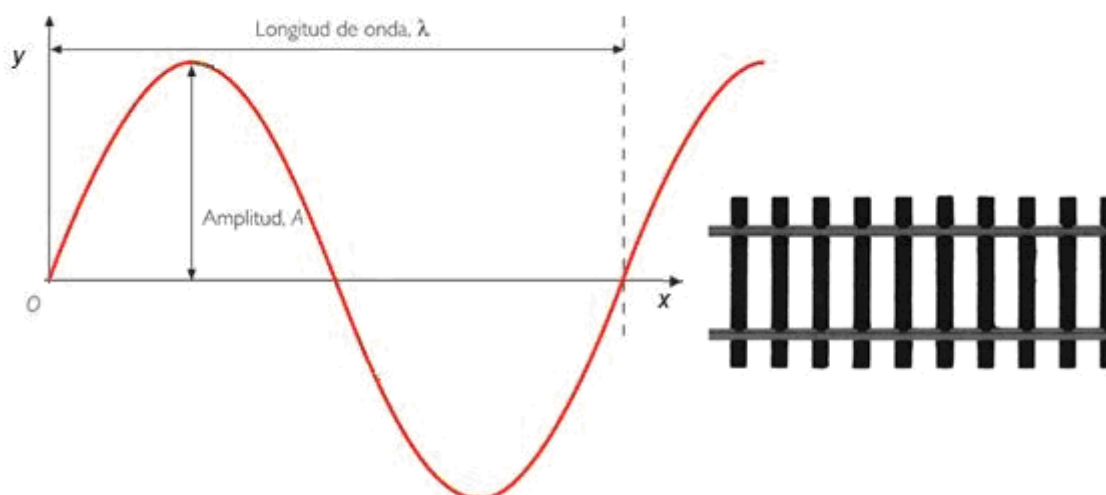
### **Irregularidades de la vía**

Adams Rail permite el modelado de raíles de vías defectuosos mediante la entrada de un cierto tipo de irregularidades de varios tipos que tratan de reproducir dichos defectos.

Como ejemplo, la irregularidad que se va a proceder a explicar va a ser analítica con forma senoidal. El bloque de irregularidades de tipo seno que ha de introducirse en el archivo de propiedades de la vía, está estructurado de la siguiente forma:

- ⇒ **TYPE:** especifica el tipo de modelo usado para las irregularidades, que en este caso debe ser *ANALYTIC\_SINUS*.
- ⇒ **FORMAT:** sólo *ANA\_I* es el formato disponible para este modelo de irregularidades.
- ⇒ **DIRECTION:** Se especifica en que dirección va a ser aplicada la irregularidad:
  - **LATERAL:** irregularidades aplicadas en la dirección lateral.
  - **VERTICAL:** irregularidades aplicadas en la dirección vertical.
- ⇒ **CANT o ROLL:** irregularidades aplicadas por deficiencia de la vía en forma de giro o vuelco (ángulo de *roll*).
- ⇒ **GAUGE:** variación del *Gauge* o distancia nominal entre raíles.
- ⇒ **RAIL\_SIDE:** especifica en qué raíl las irregularidades van a ser aplicadas. Puede ser *left* / *right* ó *both*. Si la irregularidad se va a aplicar sobre el *gauge*, estará siempre fijado a *both*.
- ⇒ **SHIFT:** usado para fijar el seno del raíl izquierdo contra el del raíl derecho (válido sólo para *RAIL\_SIDE=both* y *DIRECTION=VERTICAL/LATERAL*).
- ⇒ **STARTING\_S:** posición o abscisa de la vía donde comienzan las irregularidades (*S0*).
- ⇒ **AMPLITUDE:** amplitud de la irregularidad senoidal (*A*). La amplitud representará un valor angular cuando *DIRECTION = ROLL*.
- ⇒ **WAVE\_LENGTH:** longitud de onda de la irregularidad senoidal (*WL*).
- ⇒ **CYCLES:** Número de ciclos.

En la *figura 32* se indican los parámetros que hay que considerar para introducir las irregularidades de forma senoidal en la vía que definirán el desplazamiento lateral de la misma.



**Figura 32: Parámetros que definen la irregularidad de una vía.**

Con la herramienta *Curve Manager* no es posible representar dicha irregularidad gráficamente, pero sí se puede comprobar el valor de los parámetros que la definen, e incluso modificarlos si fuera necesario, tal y como aparecen en la *figura 33*.

Total Length	125.0
Irregularities	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
Set Irregularities	▼
Irregularities Type	SINUS ▼
Format	ANA_1 ▼
Direction	lateral ▼
Rail Side	both ▼
Starting S	1.0
Amplitude	8.0E-002
Wave Length	8.0
Cycles	1.25E-002
Shift	0.0
Apply	

**Figura 33: Menú de irregularidades en Curve Manager.**

### 6.2.2.2 Configuración y propiedades del contacto rueda-raíl

En Adams Rail también se van a usar archivos de propiedades específicos para configurar el contacto entre la rueda y el raíl. Las características del contacto también van a ser definidas y guardadas en archivos de propiedades específicos, que Adams Rail va a usar como información y herramienta para calcular automáticamente los parámetros que necesita para llevar a cabo el análisis.

Los archivos de contacto se encuentran en la carpeta *contact\_configurations.tbl* con la extensión (.ccf). Se podrán modificar desde cualquier editor de texto. Al abrir un archivo de propiedades de contacto, se observa en primer lugar un conjunto de bloques comunes a todos estos archivos, de tipo *WRGEN*. Estos bloques son [24]:

- ⇒ **MDI\_HEADER**: información genérica sobre el archivo de configuración del contacto.
- ⇒ **UNITS**: unidades usadas para los parámetros de contacto (sólo unidades del sistema Internacional).
- ⇒ **MODEL**: parámetros generales de disposición para de la vía. Este bloque de datos especifica diferentes modelos y formatos de contacto.
- ⇒ **CONFIGURATION**: descripción analítica de la vía en el plano horizontal. Este bloque de datos especifica diferentes configuraciones de contacto.
- ⇒ **CONTACT\_I**: se especifican los parámetros requeridos para el cálculo de las fuerzas de contacto. Su contenido puede variar, pudiendo optar entre las diferentes posibilidades que ofrece Adams/Rail para el cómputo de las fuerzas de contacto. Su contenido es el siguiente:
  - **TYPE**: especifica el tipo de elemento o de archivo usado para la configuración del contacto. En este caso *WRGEN*.
  - **MODE**: modo de computación.
  - **HERTZIAN\_DAMPING\_RATIO**: es el valor del amortiguamiento de los raíles, dado en forma de valor proporcional o porcentual, en relación a la rigidez de los mismos.
  - **MUX\_TYPE**: especifica si el coeficiente de fricción es dependiente del creepage longitudinal o no. Si se considera que no depende, *MUX\_TYPE=CONSTANT*, pero también existe la posibilidad de considerar esta dependencia, en cuyo caso habría que fijarlo como *MUX\_TYPE=SPLINE* e introducir esa dependencia a través de otro parámetro en el que se especifica dicha relación a través de los datos de un spline.
  - **MUX**: Coeficiente de fricción.
  - **MUWY\_TYPE**: especifica si el coeficiente de fricción es dependiente o no, de la posición lateral del punto de contacto con respecto a los perfiles de la rueda y el raíl. Si se considera que no depende, *MUX\_TYPE=CONSTANT*, pero también existe la posibilidad de considerar esta dependencia, en cuyo caso habría que fijarlo como *MUX\_TYPE=SPLINE* e introducir esa dependencia, al igual que en el caso de *MUX\_TYPE*, a través un spline. Sin embargo en este caso se va a tomar



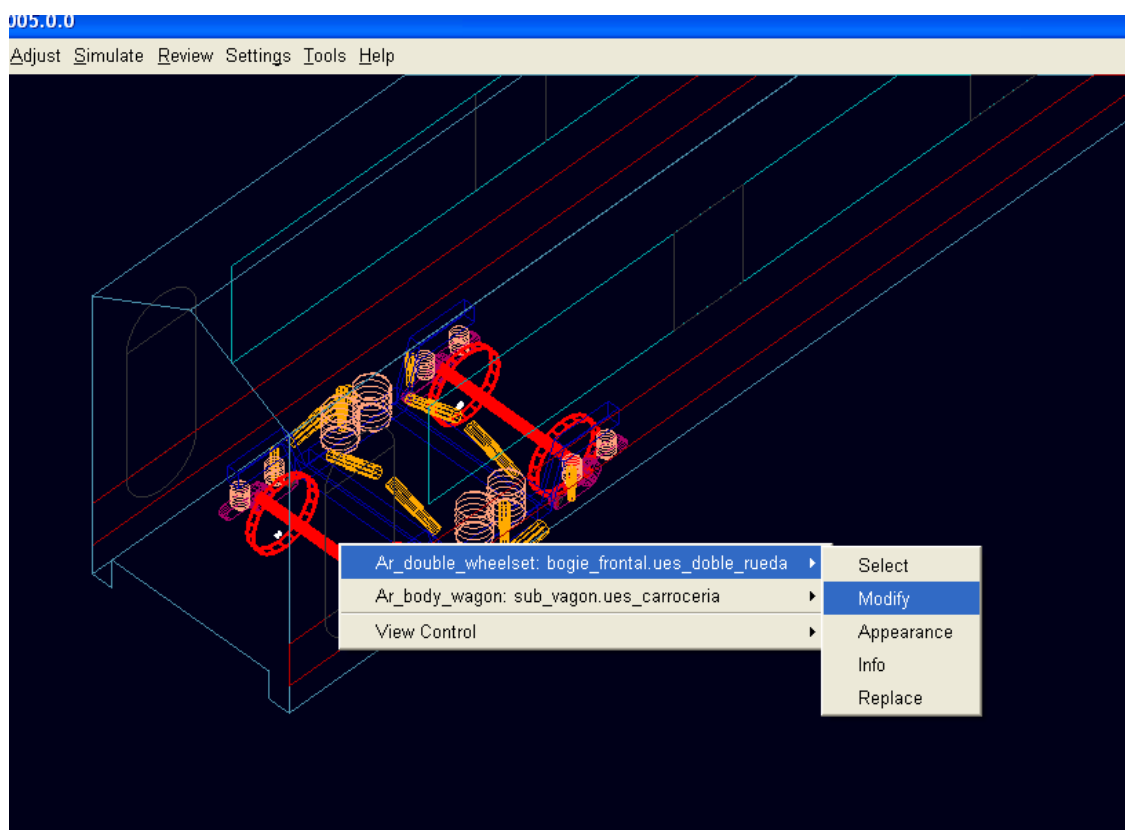
como parámetro para el spline un valor porcentual del coeficiente de fricción *MUWY*.

- ***MUWY***: Valor porcentual del coeficiente de fricción. Sólo tiene utilidad cuando *MUWY\_TYPE=SPLINE*. Se asume que vale 1 cuando *MUWY\_TYPE=CONSTANT*, pero si se quiere, se puede especificar un valor diferente.
- ***MUWY\_REF***: se especifica si el spline que relaciona la dependencia del coeficiente de fricción *MUWY* con la coordenada lateral del punto de contacto, toma como referencia el perfil de la rueda *MUWY\_REF=WHEEL* o el del raíl *MUWY\_REF=RAIL*. Sólo se usa cuando *MUWY\_TYPE=SPLINE*.
- ***MUWX\_TYPE*, *MUWX***: tienen la misma finalidad que *MUWY\_TYPE* y *MUWY*, sólo que ahora se considera la dependencia del coeficiente de fricción con la posición longitudinal del punto de contacto en la vía. Sólo tiene sentido también cuando *MUWX\_TYPE=SPLINE*.
- ***DERAIL\_Y***: con el elemento general de contacto que se va a usar (*WRGEN*), este parámetro sólo sirve para emitir un aviso por descarrilamiento. Esto ocurre cuando el desplazamiento lateral relativo entre rueda y raíl es mayor que el valor que se ha especificado para este parámetro y que es fijado por el usuario. Adams/Solver emite un mensaje diciendo que el vehículo está cerca de la condición de descarrilamiento, pero sólo se trata de un valor aproximado introducido por el usuario y no de un criterio real de descarrilamiento.
- ***KALKER\_FACTOR***: representa el factor de escala que se aplica a los coeficientes de Kalker.
- ***CREEP\_FORCE\_CALC\_METHOD***: representa el algoritmo que se va a usar para la resolución del problema tangencial. Se va a fijar este parámetro a *FASTSIM*, y de esta forma el algoritmo que va a ser utilizado para el cómputo va a ser una modificación del algoritmo *FASTSIM* de *Kalker*, desarrollado en TU-Berlin por el Dr. Knothe. También es posible usar el método de *POLACH*, fijando este parámetro como tal.
- ***MXFSIM*, *MYFSIM***: representan el número de líneas de cuadrícula o de mallado, longitudinales y transversales respectivamente, que van a ser usadas por el algoritmo *FASTSIM*.

## 6.3 CONFIGURACIÓN DEL PERFIL DE LA RUEDA

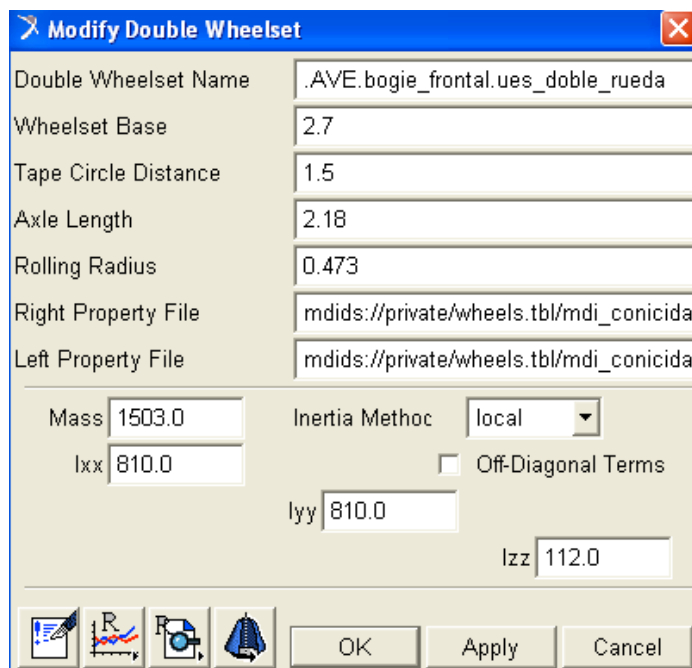
Los parámetros que se han fijado en el la creación del *single wheelset* pueden ser modificados, tanto en *Template Builder* como también en *Standard Interface* cuando un subsistema haga uso de la plantilla (*template*) que ese va a crear para el eje, haciendo referencia a él.

Para modificar dichas propiedades debemos pinchar con el botón derecho del ratón sobre el *wheelset* que deseamos modificar. Nos aparecerá el siguiente menú como se muestra en la *figura 34*, a través del cuál podremos acceder al menú de propiedades así como a la herramienta *Curve Manager*.



**Figura 34: Menú wheelset.**

Una vez estamos en este menú, nos emergerá otro al pinchar sobre modificar, donde podremos cambiar las propiedades de nuestro wheelset. En la *figura 35* se muestra dicho menú:



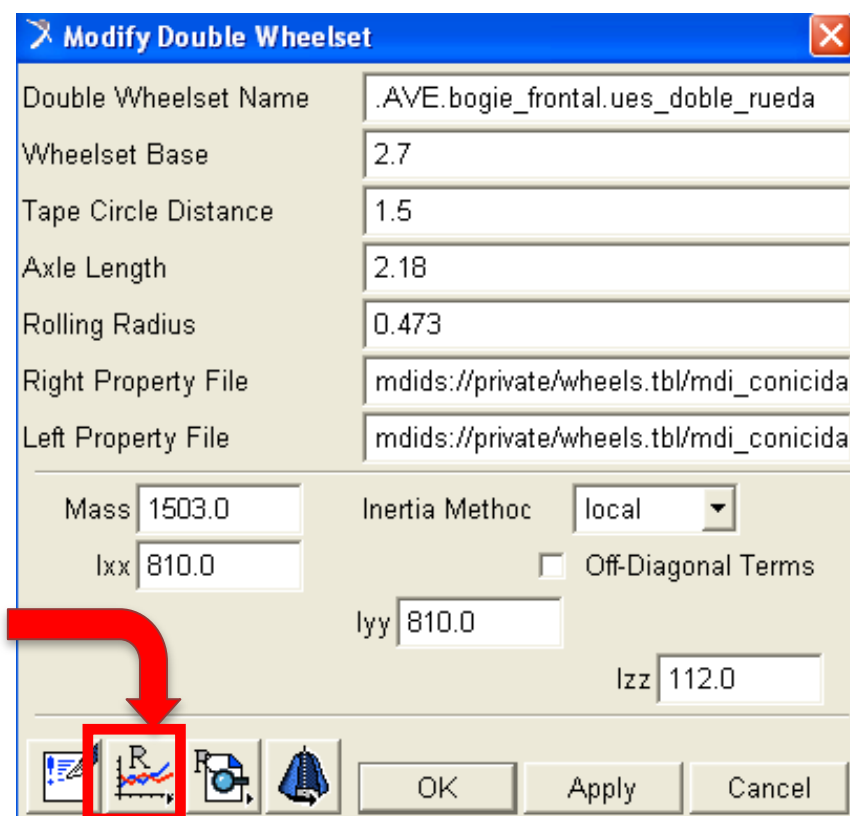
**Figura 35: Modificación del wheelset y acceso a Curve Manager.**

- Double Wheelset Name: Nombre del conjunto ejes-ruedas
- Wheelset Base: Distancia
- Tape Circle Distance: Distancia existente entre las dos ruedas, derecha e izquierda, tomando como referencia el centro de cada rueda, donde el radio va a ser igual al nominal (0.473m). Tendrá un valor de 1.5m
- Axle Length: Es la longitud total del eje central y en este caso va a ser igual a 2.18m.
- Rolling Radius: Radio nominal de las ruedas, el cual utilizaremos como referencia a la hora de calcular los nuevos valores de conicidad de nuestra rueda..
- Right / Left Property File: Archivos de propiedades que van a contener toda la información sobre los perfiles de las ruedas, derecha e izquierda, y también de las propiedades del material de las mismas. Estos archivos han sido creados de forma que se ha introducido en ellos la información de los perfiles de ruedas requeridas. Los archivos de propiedades de las ruedas derecha e izquierda van a ser idénticos, con lo cual sólo se ha creado uno por cada conicidad, los cuales han sido almacenados en la base de datos private.cdb . Más adelante explicaremos como se han creado estos archivos.
- Mass: Masa del eje.

Ixx, Iyy, Izz: Propiedades de inercia del eje, se puede expresar los momentos o bien respecto al sistema de referencia local o bien en el sistema de referencia global teniendo

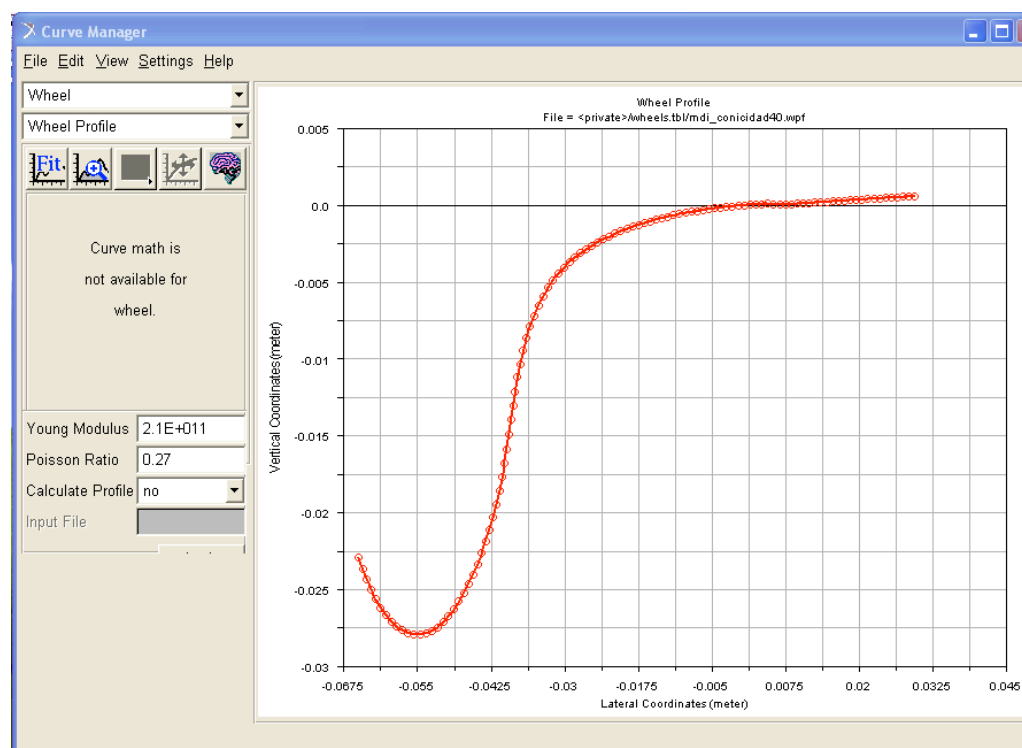
en cuenta que ( local  $z$  = global  $y$ ). En este caso se han expresado respecto al sistema de referencia local, cuyo eje  $z$  coincide con el de simetría de revolución del eje.

Para ver con detalle el perfil de las ruedas se tiene que usar la herramienta Curve Manager que aparece en el menú al modificar las propiedades del wheelset.



**Figura 36: Acceso al Curve Manager.**

En la ventana de la figura 36, si se pincha con el cursor en el icono señalado por la flecha, se va a acceder a la herramienta Curve Manager, que aparecerá en pantalla como se muestra en la figura, dónde se va a poder observar el perfil de las ruedas.



**Figura 37: Perfil de rueda de conicidad 1/40**

También aparece en el Curve Manager información sobre algunas de las propiedades del material, como son el Modulo de Young ( $2.1 \text{ E}+11$ ) y el coeficiente de Poisson (0.27). Además esta herramienta es la que vamos a utilizar para crear el archivo de propiedades de las ruedas Conicidad\_ii.wpf (siendo ii el valor del denominador de la conicidad), que también se ha almacenado en la base de datos private.cdb dentro de la carpeta wheels.tbl y que se ha usado directamente para definir las propiedades de las ruedas del eje, como se observa en la *figura 37*, aunque previamente se ha tenido que crear dicho archivo.

Como se puede observar en la figura, el perfil de la rueda esta definido por una serie de puntos, en concreto, 110 puntos que a través del cálculo que realiza el software, crea la curva de Spline que define nuestro perfil. Por tanto para poder cambiar dicha conicidad debemos variar los puntos que definen la zona de rodadura de nuestra rueda, guardarlo e introducirlo a través de Input File, que aparece a la izquierda del perfil en la herramienta Curve Manager.

### 6.3.1 OBTENCIÓN DEL ARCHIVO DE PROPIEDADES DE LA RUEDA.

Los archivos de propiedades de las ruedas (.wpf) van a contener información sobre los perfiles de las ruedas, así como también de algunas propiedades del material de las mismas. Para el eje que se quiere definir, las dos ruedas tienen las mismas características, con lo cual sólo va a hacer falta crear un único archivo de propiedades.

```

$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_TYPE      = 'wpf'
FILE_VERSION    = 4.0
FILE_FORMAT     = 'ASCII'
$-----UNITS
[UNITS]
LENGTH         = 'meter'
ANGLE          = 'radians'
FORCE          = 'newton'
MASS           = 'kg'
TIME           = 'second'
$-----MODEL
[MODEL]
TYPE           = 1
FORMAT         = 'STANDARD'
$-----MATERIAL
[MATERIAL]
Y_MODULUS      = 210000000000.0
P_RATIO        = 0.27
$-----PROFILE_XC1C2
[PROFILE_XC1C2]
{
  X              C1              C2
-6.50000000000000000000E-002  -2.2935667166998699E-002  -1.0430129269653905E+000
-6.4306002556652475E-002      -2.3653147381180000E-002  -1.0154850567744667E+000
-6.3595008405249731E-002      -2.4350671522214484E-002  -9.4039598806069769E-001
-6.2852195010897269E-002      -2.5011623436513267E-002  -8.3757946991526111E-001
-6.2069166891074029E-002      -2.5623131923912634E-002  -7.2444681300091618E-001
-6.1242554655091964E-002      -2.6174243754497079E-002  -6.1076640716728647E-001
-6.0373766793879270E-002      -2.6657196112660295E-002  -5.0306143056607955E-001
-5.9467275461862867E-002      -2.7066872547861335E-002  -4.0267761363935095E-001
-5.8529077961018583E-002      -2.7399929487941097E-002  -3.0868482981294426E-001
-5.7565644676572249E-002      -2.7653808051540180E-002  -2.1932505593340409E-001
-5.6583672052396249E-002      -2.7826544581993035E-002  -1.3311271837454908E-001
-5.5589996071017715E-002      -2.7916727972139385E-002  -4.8721769010961681E-002
-5.4591559441765337E-002      -2.7923541206223049E-002  +3.5056205526799902E-002
-5.3595353989552182E-002      -2.7846738846809355E-002  +1.1940348743217538E-001
-5.2608364423006503E-002      -2.7686726590517064E-002  +2.0537301980774489E-001
-5.1637458214421506E-002      -2.7444745194576788E-002  +2.9388005223488134E-001

```

**Figura 38: Archivo de propiedades de la rueda**

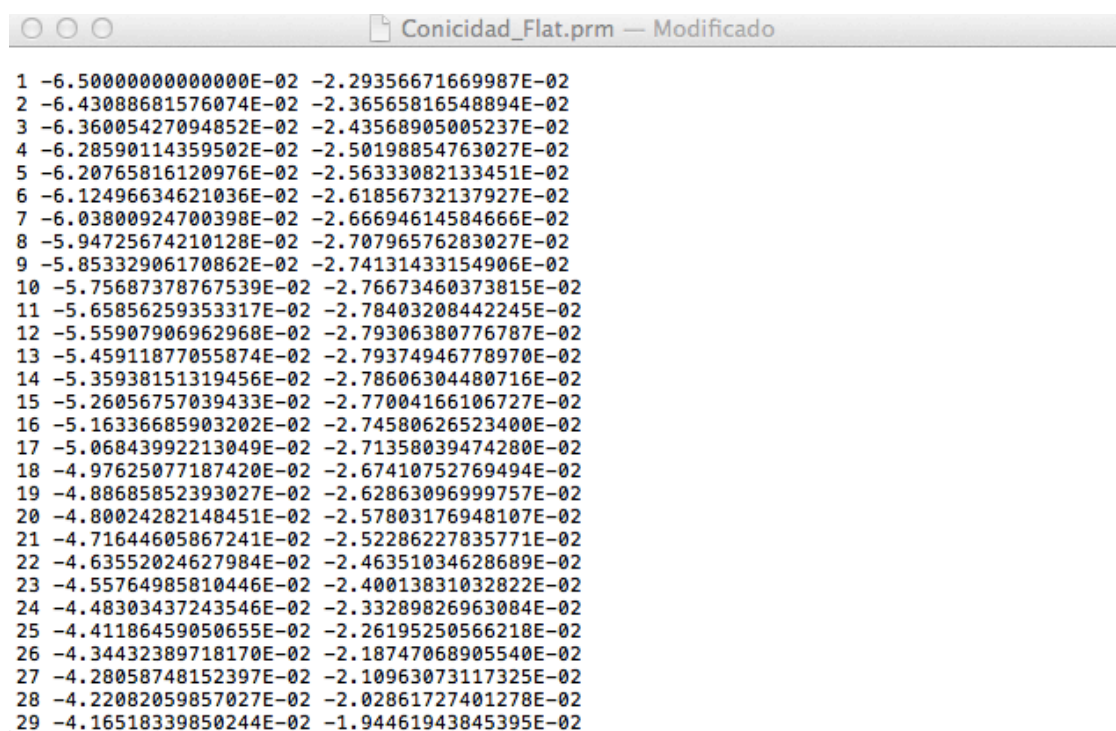
Como se ha dicho en el apartado anterior, se va a poder crear o modificar el perfil de la rueda usando la herramienta Curve Manager. La entrada de información sobre el perfil de la rueda en el Curve Manager se hace mediante un archivo en formato PRM.

Se parte de un archivo de datos usado por el programa comparativo en el que se describe el perfil de la rueda, no obstante hay que modificarlo y transformarlo al formato PRM. En primer lugar, en el programa comparativo los datos del perfil vienen dados tomando como referencia el eje geométrico de la rueda, mientras que en el formato PRM el origen del sistema de coordenadas donde se representa el perfil de la rueda está posicionado en el punto del perfil donde el radio de la rueda es igual al radio nominal (0.473m); por ello hay que restar dicho radio nominal a las cantidades que aparecen en la 2ª columna de los datos del programa comparativo, ver *figura 38*, que representan la distancia desde cada punto del perfil al eje de la rueda. Además hay que cambiar de signo las cifras obtenidas, por estar orientado en sentido contrario el eje en el que se mide dicha distancia, con respecto a la ordenada y del sistema de coordenadas que utiliza MSC.Adams Rail para describir el perfil de la rueda. [25]

Por tanto para poder realizar lo explicado anteriormente, es decir, crear el archivo PRM, primero debemos crear el archivo mediante el editor de texto, en nuestro caso *TextEdit*, en el cual, se dispondrá de tres columnas.

- **1ª Columna:** Indicará el orden de posición del punto en el perfil de nuestra rueda, empezando por 1, siendo éste el valor cuya coordenada Y (considerando el sistema de coordenadas definido en el capítulo 4) es menor, hasta la posición 110, que pertenecerá al punto cuya coordenada X es mayor.
- **2ª Columna:** Indicará la distancia en el eje Y (dirección axial) entre el origen del eje de coordenadas y nuestro punto. Ordenados en orden ascendente como hemos comentado anteriormente. Corresponde con la columna X del archivo de propiedades (.wpf) de la rueda.
- **3ª Columna:** Indicará la distancia en el eje X (dirección radial) entre el origen del eje de coordenadas y nuestro punto. En este caso esta columna corresponde a la segunda columna (C1) del archivo de propiedades (.wpf) de la rueda.

En la *figura 39* se aprecia como quedaría nuestro archivo de texto:



```

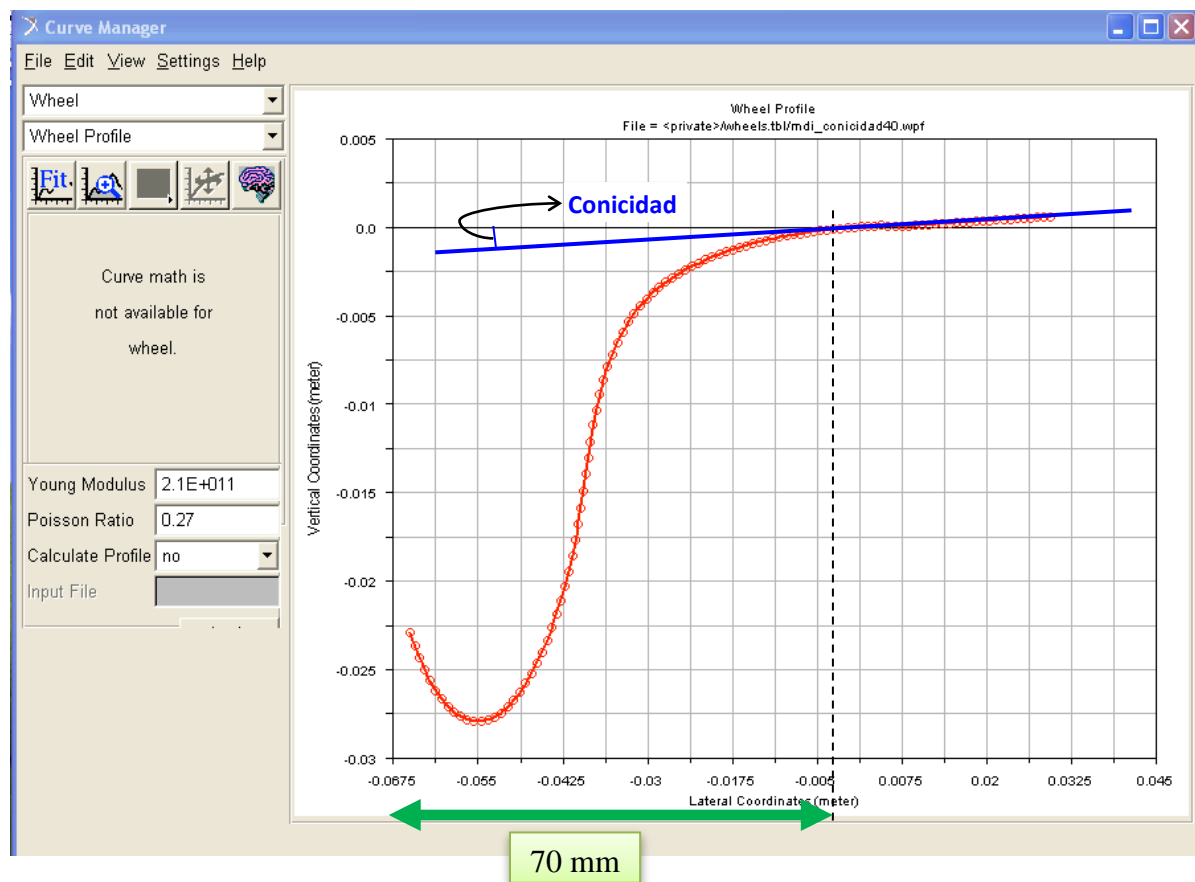
1 -6.50000000000000E-02 -2.29356671669987E-02
2 -6.43088681576074E-02 -2.36565816548894E-02
3 -6.36005427094852E-02 -2.43568905005237E-02
4 -6.28590114359502E-02 -2.50198854763027E-02
5 -6.20765816120976E-02 -2.56333082133451E-02
6 -6.12496634621036E-02 -2.61856732137927E-02
7 -6.03800924700398E-02 -2.66694614584666E-02
8 -5.94725674210128E-02 -2.70796576283027E-02
9 -5.85332906170862E-02 -2.74131433154906E-02
10 -5.75687378767539E-02 -2.76673460373815E-02
11 -5.65856259353317E-02 -2.78403208442245E-02
12 -5.55907906962968E-02 -2.79306380776787E-02
13 -5.45911877055874E-02 -2.79374946778970E-02
14 -5.35938151319456E-02 -2.78606304480716E-02
15 -5.26056757039433E-02 -2.77004166106727E-02
16 -5.16336685903202E-02 -2.74580626523400E-02
17 -5.06843992213049E-02 -2.71358039474280E-02
18 -4.97625077187420E-02 -2.67410752769494E-02
19 -4.88685852393027E-02 -2.62863096999757E-02
20 -4.80024282148451E-02 -2.57803176948107E-02
21 -4.71644605867241E-02 -2.52286227835771E-02
22 -4.63552024627984E-02 -2.46351034628689E-02
23 -4.55764985810446E-02 -2.40013831032822E-02
24 -4.48303437243546E-02 -2.33289826963084E-02
25 -4.41186459050655E-02 -2.26195250566218E-02
26 -4.34432389718170E-02 -2.18747068905540E-02
27 -4.28058748152397E-02 -2.10963073117325E-02
28 -4.22082059857027E-02 -2.02861727401278E-02
29 -4.16518339850244E-02 -1.94461943845395E-02
    
```

**Figura 39:** Archivo en formato PRM de la conicidad de las ruedas.

Creado ya nuestro archivo PRM, es hora de calcular los valores que nos darán la conicidad (pendiente) deseada para nuestra rueda. Para ello sólo vamos a modificar los

puntos en los cuales la rueda presenta la conicidad, en nuestro caso, vamos a variar los puntos ubicados a una distancia de 70 mm, como se muestra en la *figura 40* medidos desde el exterior de la pestaña donde se encuentra el radio de rodadura. El perfil de una rueda de un vehículo ferroviario presenta gran complejidad a la hora de diseñarlo y se necesitan de herramientas externas, como puede ser Matlab, para poder definirlo, con exactitud. Como el objetivo del presente PFC, no es realizar un perfil real, se idealiza dicho perfil considerando que la conicidad de la rueda comienza a partir del radio de rodadura, y es constante hasta el final del perfil.

En la *figura 40* indicamos el punto a partir del cual deberemos modificar los valores, haciendo uso de la herramienta *Curve Manager*.



**Figura 40: Ubicación del punto donde se inicia la conicidad de la rueda**

Una vez conocidas las coordenadas del punto ubicado a 70 mm de la cara exterior de la pestaña, procedemos al cambio de los valores de los puntos comprendidos entre el punto 86 y el 110, ambos incluidos del archivo *.prm* creado, con los valores que nos permiten establecer la conicidad deseada.



### 6.3.2 CALCULO DE LOS NUEVOS VALORES DE CONICIDAD

Como hemos comentado anteriormente, las ruedas de los vehículos ferroviarios no son planas, sino que presentan una conicidad. En curvas, el carril exterior tendrá un radio más grande que el carril interior. Esto significa que una rueda cilíndrica tiene que recorrer más distancia en el carril exterior que en el interior. Como las ruedas que se mueven en los carriles interiores y exteriores deben tener el mismo número de revoluciones por unidad de tiempo, esto no puede producirse por rodamiento puro. Para que las distancias recorridas por las dos ruedas sean iguales, una o las dos deslizarán aumentando así la resistencia a la rodadura, y causando desgaste entre la rueda y rail. La solución es fabricar la superficie de rodadura de las ruedas con un perfil cónico cuyo ángulo de inclinación sea variable con respecto el eje montado, dicha inclinación se calcula mediante la expresión:

$$\frac{\gamma}{2} = i = \frac{\Delta r}{\Delta y} = \frac{r_i - r_n}{y_i - y_n} \quad ec. 16$$

Siendo:

- $i$ : inclinación.
- $\gamma$ : Conicidad
- $r_i$ : Radio de la rueda para que la conicidad sea la deseada respecto del radio del radio nominal.
- $r_r$ : Radio nominal de la rueda
- $y_i$ : Distancia axial del punto del cual queremos calcular su radio ( $r_i$ ). Valor de la primera columna del archivo PRM.
- $y_n$ : Distancia axial del radio nominal.

Despejando obtenemos que:

$$r_i = r_n - 2 \cdot i(y_i - y_n) \quad [mm] \quad ec. 17$$

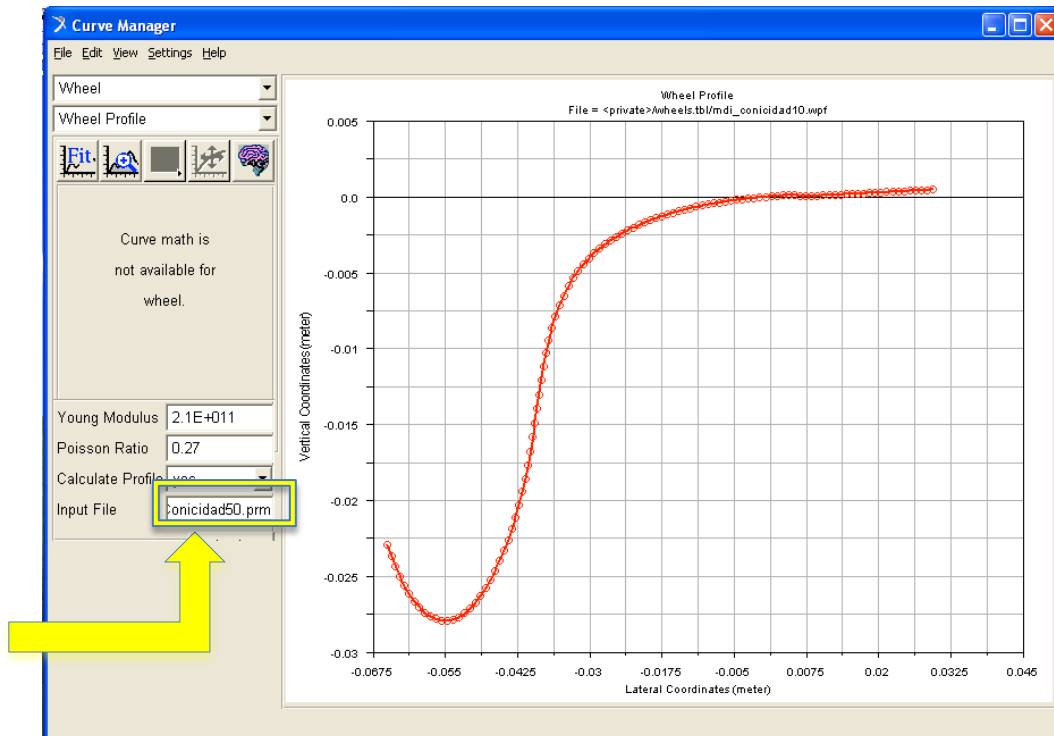
Ahora como debe estar definido respecto del origen:

$$r_{if} = r_n - r_i \quad [mm] \quad ec. 18$$

Por tanto conocidas la inclinación ( $i$ ), la distancia axial entre los puntos ( $y$ ) y el radio de rodadura ( $r_r$ ), despejamos el radio  $r_i$ , que será el valor de la segunda columna de nuestro punto. Nos ayudamos de la herramienta Excel para el caculo de los demás puntos

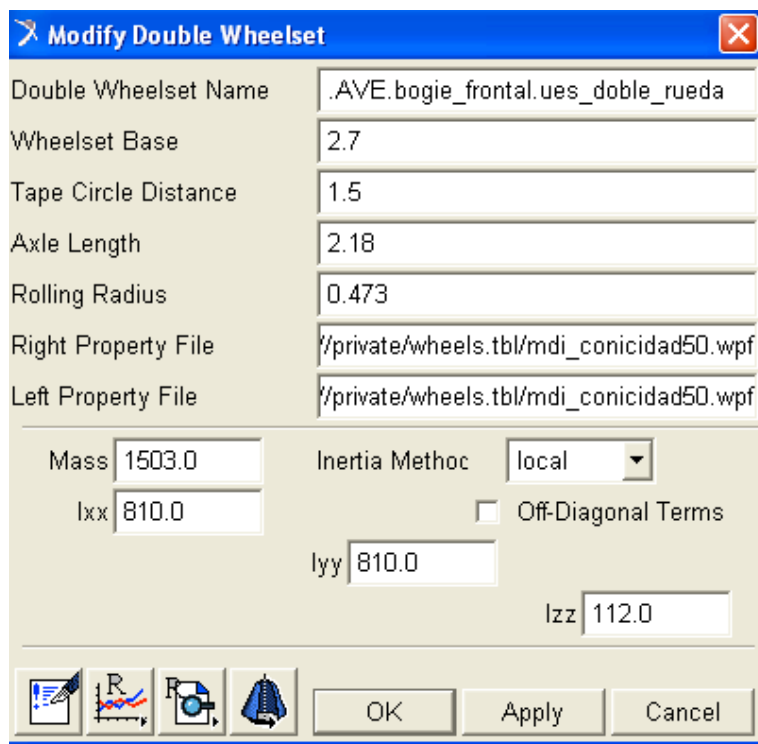
y así, una vez finalizado ya tenemos nuestro archivo en formato *.prm* disponible para crear el archivo de propiedades de las ruedas con la conicidad deseada.

Ahora debemos abrir de nuevo *Curve Manager* e introducir, donde indica la *figura 41*, el archivo *.prm* que hemos creado y clicar en aplicar. Como veremos el perfil de nuestra rueda a cambiado y ahora solo que guardarlo como archivo *.wpf*.



**Figura 41: Crear archivo .wpf**

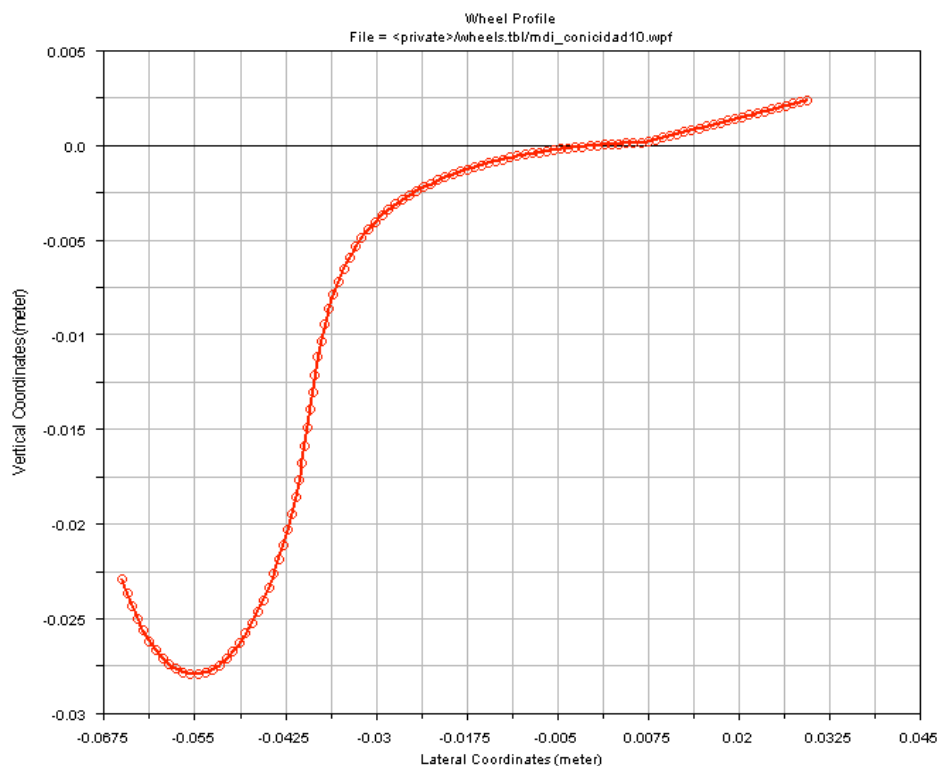
Guardado ya este archivo sólo nos queda abrirlo en las propiedades de las ruedas, como se indica en la *figura 42* y ya tendremos configurado nuestro vehículo con la conicidad de las ruedas deseada.



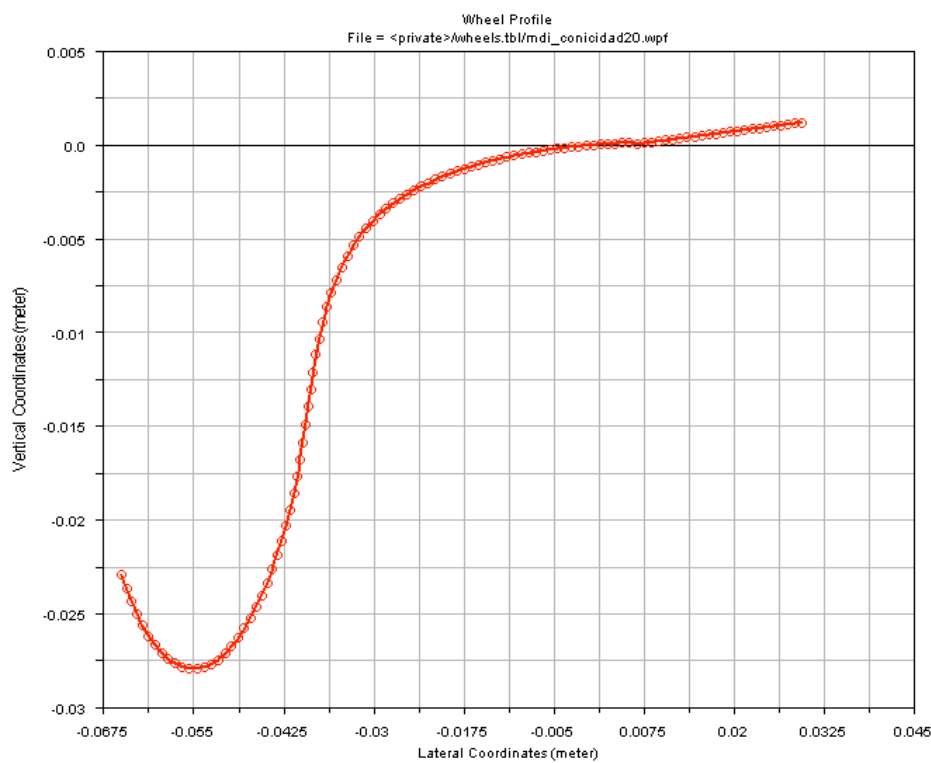
Double Wheelset Name	.AVE.bogie_frontal.ues_doble_rueda		
Wheelset Base	2.7		
Tape Circle Distance	1.5		
Axle Length	2.18		
Rolling Radius	0.473		
Right Property File	/private/wheels.tbl/mdi_conicidad50.wpf		
Left Property File	/private/wheels.tbl/mdi_conicidad50.wpf		
Mass	1503.0	Inertia Method	local
Ixx	810.0	<input type="checkbox"/> Off-Diagonal Terms	
Iyy	810.0		
Izz	112.0		

**Figura 42: Selección del archivo de propiedades de la rueda**

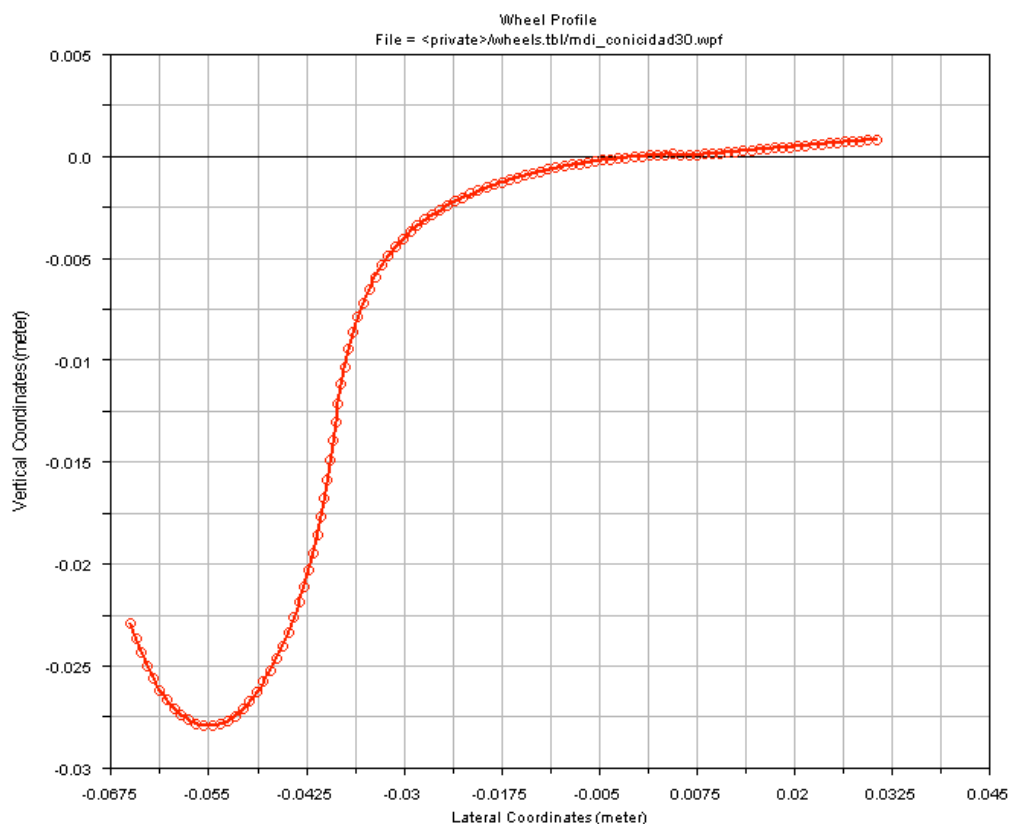
Este proceso lo hemos realizado para obtener las conicidades 1/10, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50, rueda plana, quedando los perfiles como se muestran en las *figuras de 43 a 48*. que utilizaremos posteriormente para realizar las simulaciones y ver como se comporta nuestro vehículo en diferentes escenarios.



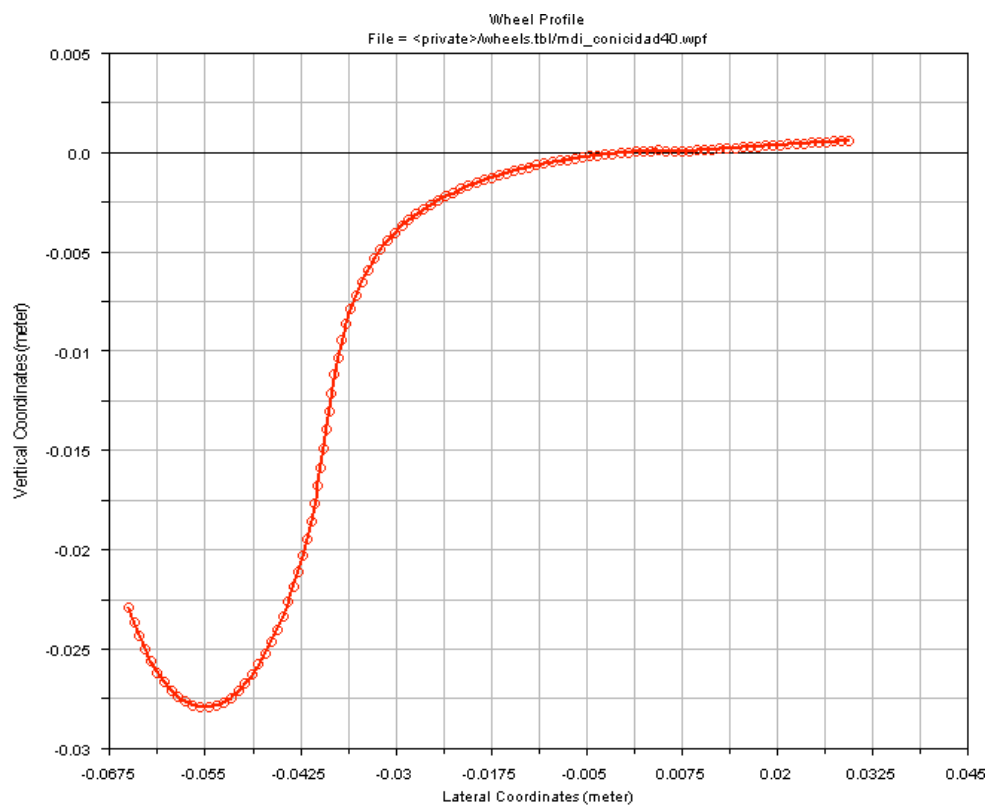
**Figura 43: Perfil de rueda de conicidad 1/10.**



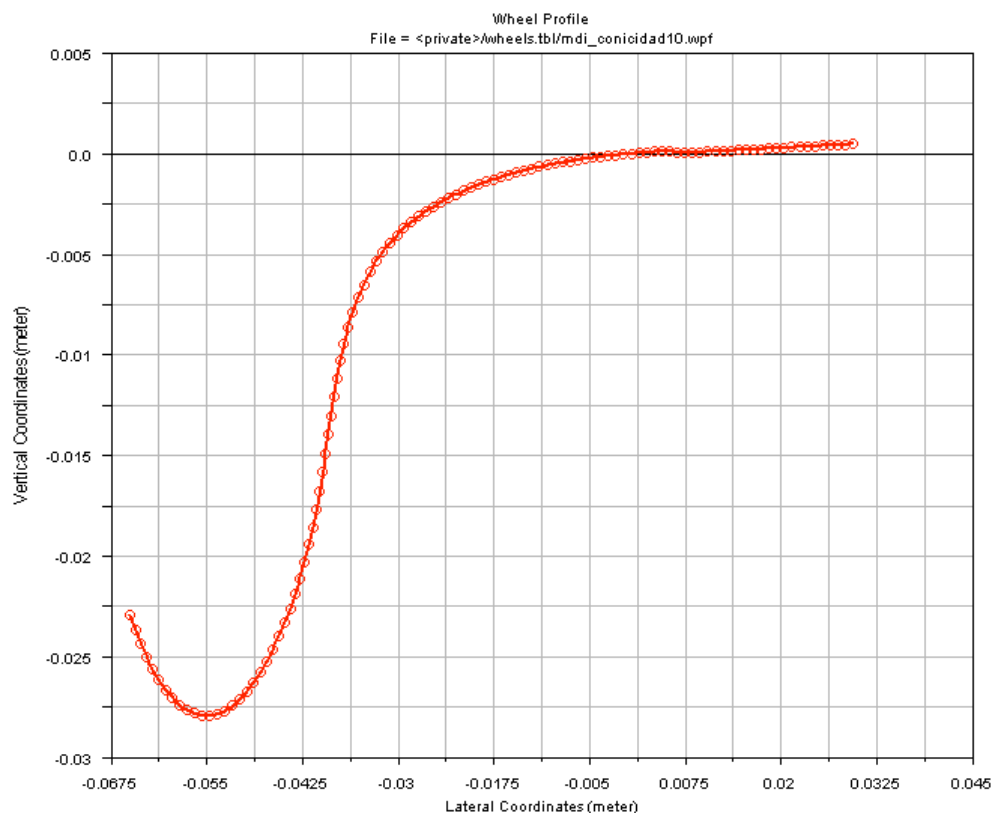
**Figura 44: Perfil de rueda de conicidad 1/20.**



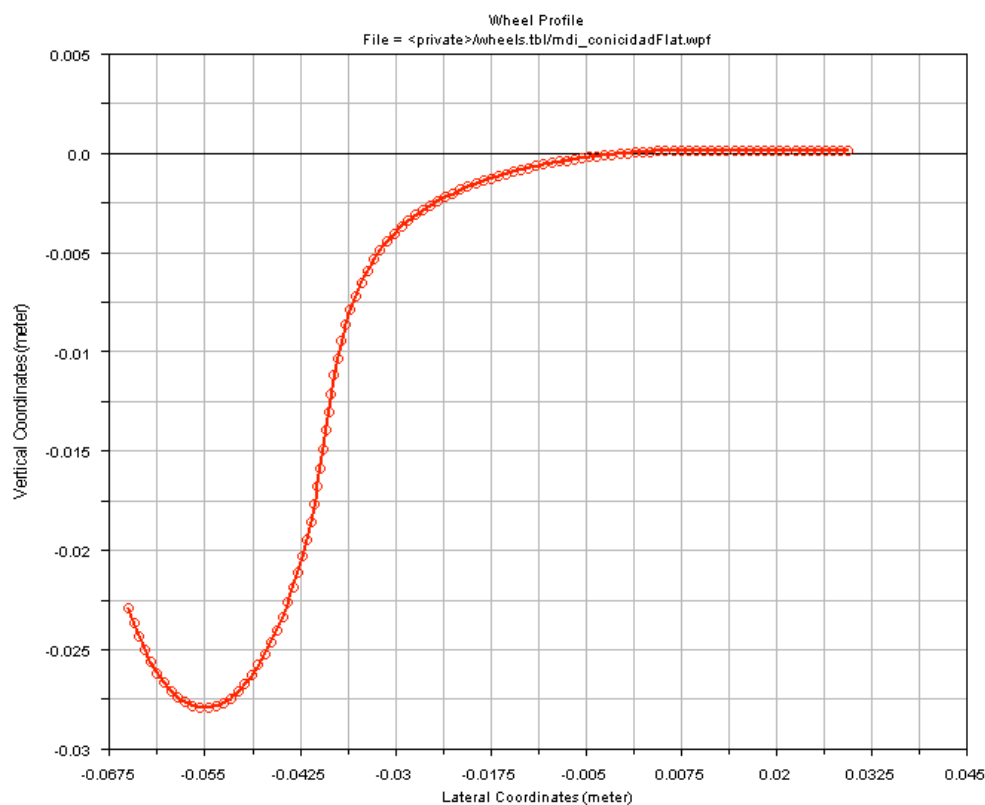
**Figura 45: Perfil de rueda de conicidad 1/30.**



**Figura 46: Perfil de rueda de conicidad 1/40.**



***Figura 47: Perfil de rueda de conicidad 1/50***



***Figura 48: Perfil de rueda plana.***



Finalizada ya la creación del archivo de propiedades de las ruedas con las diferentes conicidades podemos comenzar a realizar las simulaciones con el vehículo ferroviario creado, utilizando para el análisis de los resultados obtenidos MSC. Adams Postprocessor, que explicaremos a continuación en el siguiente capítulo.





# Capítulo 7

## Software MSC. Postprocessor



## 7.1 INTRODUCCIÓN

Con Adams Postprocessor se puede ver los resultados de simulación que se ha creado en otros productos MSC Adams, permitiendo diferentes posibilidades [26]:

- ⇒ Ver los informes.
- ⇒ Reproducir una animación de los resultados obtenidos.
- ⇒ Mostrar los resultados en forma de gráficas y en tablas.
- ⇒ Ver animaciones y gráficos simultáneamente.

De esta forma, Adams Postprocessor permite:

- ⇒ **Depuración:** depurar el modelo, permitiendo ver el prototipo en marcha, o las deformaciones del mismo en el caso del uso de elementos flexibles.
- ⇒ **Validación:** se pueden validar los resultados, ya que permite realizar operaciones matemáticas sobre ellos, así como diferentes análisis estadísticos.
- ⇒ **Mejora:** permite comparar gráficamente las soluciones de dos o más simulaciones, facilitando la mejora del modelo estudiado.
- ⇒ **Presentación de resultados:** se trata de una herramienta adecuada para la elaboración de los informes oportunos, e incluso permite realizar películas de las animaciones del prototipo virtual.

Se puede utilizar el Adams Postprocessor como un producto independiente o desde dentro de otra programa de MSC Adams.

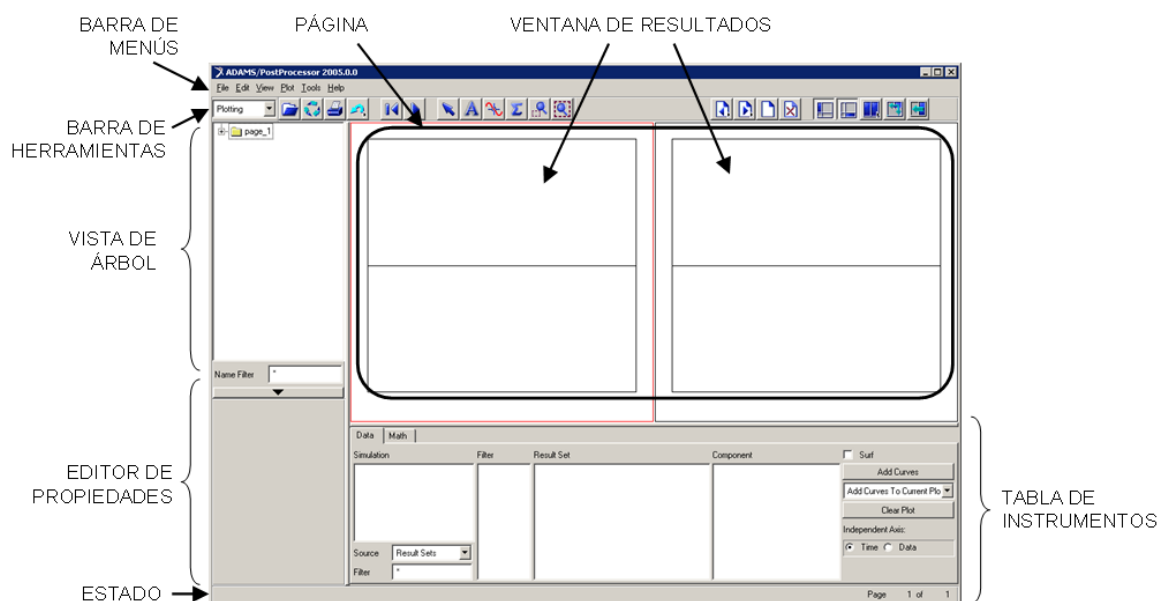
## 7.2 MENÚS DISPONIBLES EN ADAMS POSTPROCESSOR

Los elementos que se muestran en la ventana del Adams Postprocessor son los siguientes:

- ⇒ **Barra de menús (*menu bar*):** contiene los títulos de cada menú.
- ⇒ **Barra de herramientas principal (*main toolbar*):** permite trabajar con animaciones, gráficos o informes, variando la barra de herramientas según la opción.

- ⇒ **Vista de árbol (*treeview*):** muestra una lista jerárquica de los modelos y las páginas. El árbol es especialmente útil para la selección e identificación de objetos.
- ⇒ **Editor de las propiedades (*property editor*):** le permite cambiar las propiedades de los objetos seleccionados.
- ⇒ **Barra de estado (*status toolbar*):** muestra los mensajes de información mientras trabaja.
- ⇒ **Página (*page*):** muestra la página actual. Cada página puede mostrar hasta seis áreas rectangulares o ventanas en el que puede colocar animaciones y gráficos.
- ⇒ **Ventana (*viewports*):** áreas rectangulares que muestran distintos puntos de vista de las gráficas, animaciones, o informes.
- ⇒ **Panel de control (*dashboard*):** proporciona funciones para el control de animaciones o graficar los resultados.

En la *figura 49* se muestra la designación de los menús que dispone Adams Postprocessor.



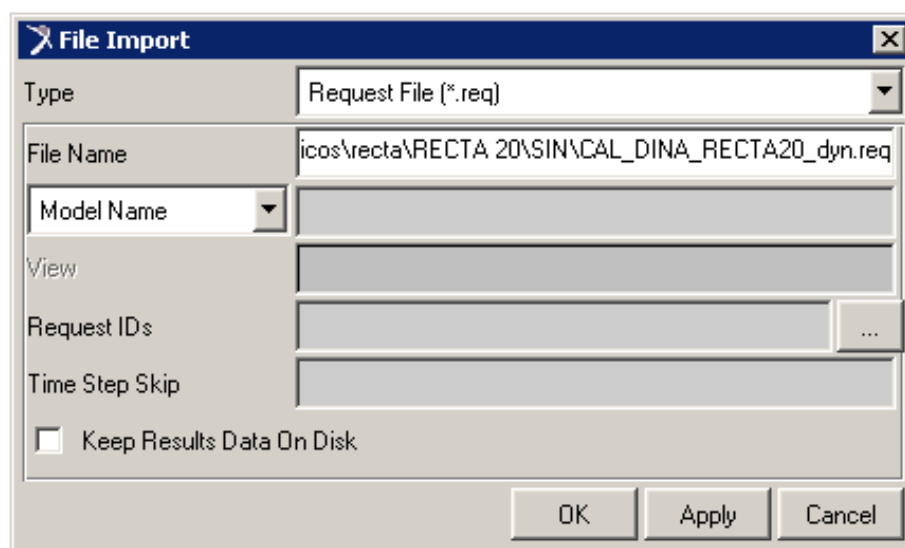
**Figura 49: Ventana de trabajo Adams Postprocessor.**

## 7.3 CÓMO IMPORTAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Adams Postprocessor permite graficar los datos de las simulaciones para que se puedan interpretar los resultados de los diseños así como trabajar con ellos. Para abrir los resultados obtenidos de la simulación se selecciona en la barra de menú los comandos *File*, *Import*, y en el cuadro emergente se introduce:

- **Tipe:** permite elegir el tipo de archivo entre una lista. En el presente capítulo se explicaran los archivos *Request File* y *Graphics File*.
- **File Name:** se busca el archivo deseado.

El menú emergente para abrir los archivos de demanda y gráficos se muestra en la *figura 50*.

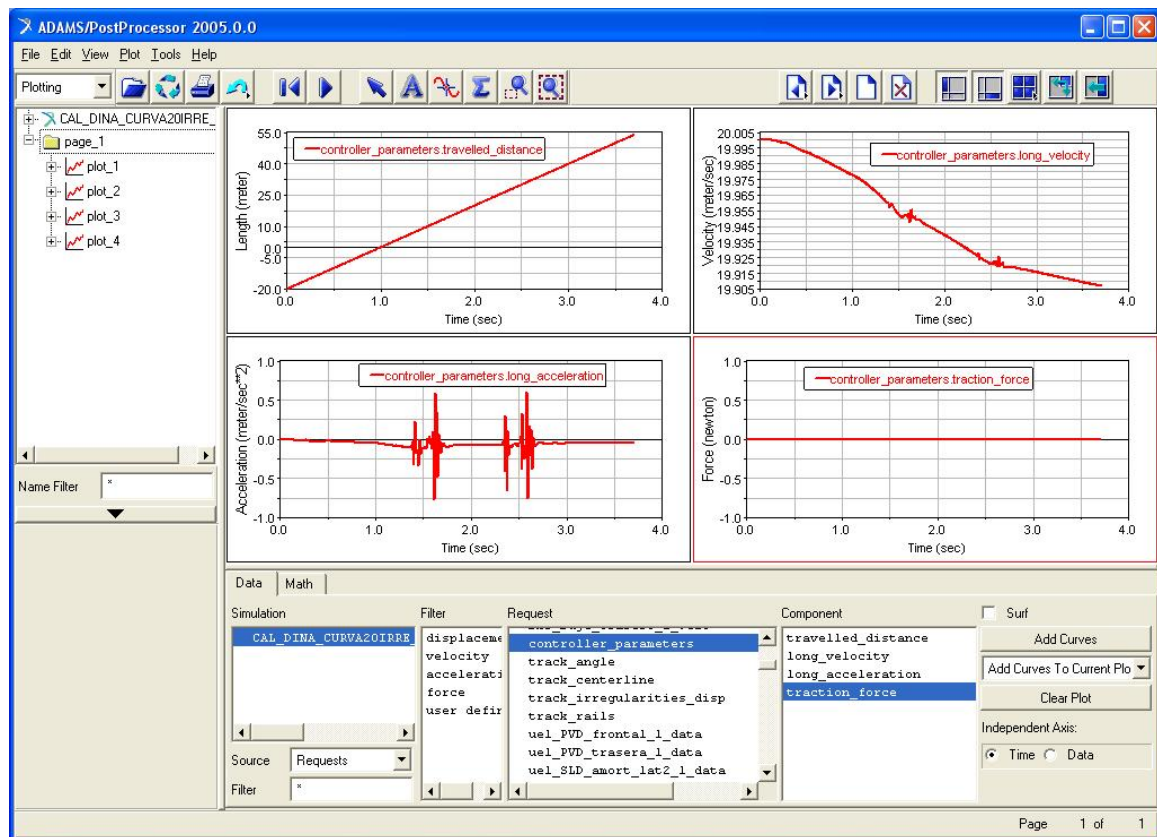


**Figura 50: Menú para importar archivo.**

En el caso de Adams Rail, los resultados más relevantes se encuentran en dos archivos que se generan al realizar la simulación:

- **Archivo de demanda (*Request File*):**

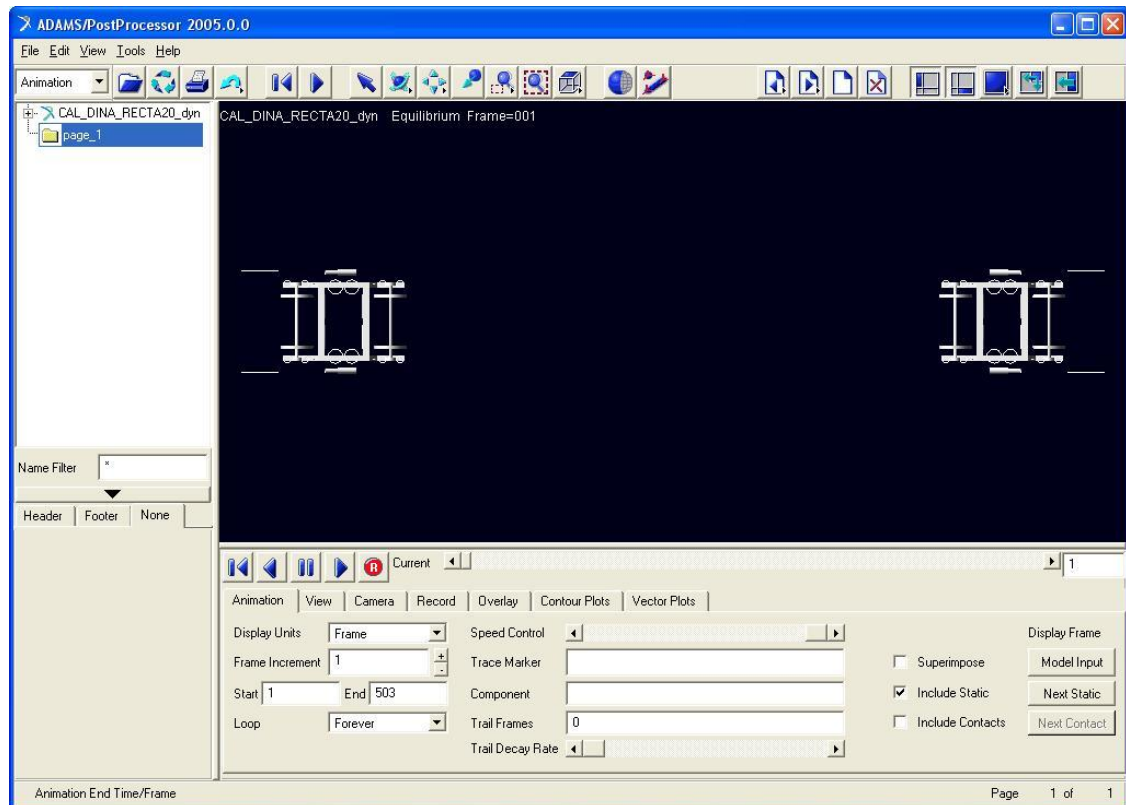
Permite crear gráficos de los resultados de la simulación mediante información sobre diversos datos de solicitud y la evolución temporal u otros parámetros. La ventana para archivos de demanda se muestra en la *figura 51*.



**Figura 51: Representación de un archivo de demanda.**

- **Archivo de gráficos (Graphics File):**

Permite crear una animación de la simulación calculada dependientes del tiempo, permitiendo variar la posición, la velocidad de simulación, orientación etc. La ventana para archivos de gráficos se muestra en la *figura 52*.



**Figura 52: Representación de un archivo gráfico.**

Así mismo, Adams Postprocessor dispone de cuatro modos que cambian automáticamente en función del contenido de la ventana activa:

- **Animation:** modo de animación visible en el *Graphics File*.
- **Plotting:** modo de trazado visible en *Request File*.
- **Report:** informes.
- **Plot 3D:** es el trazado en 3D.

## 7.4 CÓMO VISUALIZAR UN ARCHIVO DE DEMANDA

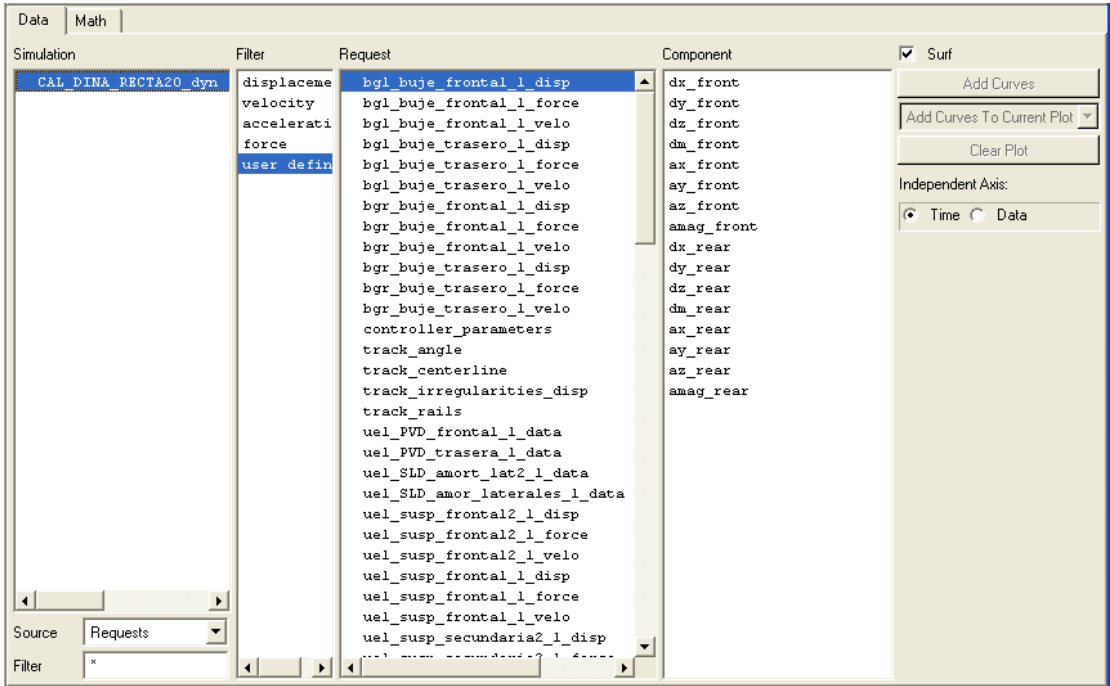
### 7.4.1 COMO REALIZAR GRÁFICO DE UN CÁLCULO DINÁMICO

Teniendo en cuenta el trabajo que nos ocupa, la simulación dinámica de un bogie, las opciones que se permite graficar empleando el archivo *Request File* son las siguientes:

- **Simulation:** se selecciona el modelo a simular. Se puede abrir simultáneamente multitud de archivos de cálculo para comparar los parámetros entre ellos. Por ejemplo se puede comparar de esta forma las gráficas de la simulación a diferentes velocidades.
- **Filter:** la única opción disponible en el cálculo realizado es *defined*. Las demás opciones son para diferentes procesos que dispone el Adams Postprocessor.
- **Request:** donde se selecciona que tipo de parámetro y sobre qué elemento del bogie se quiere obtener los resultados, como por ejemplo las fuerzas de contacto sobre la rueda izquierda del eje 1, *ues\_doble\_rueda\_1\_w2l\_contac\_force*. Adams Postprocessor indica el parámetro a seleccionar con un nombre que depende de cómo se haya nombrado cada elemento en el proceso de modelado, por tanto esta designación puede variar.
- **Component:** dependiendo de la opción elegida para *request* el programa permite graficar diferentes componentes. Se puede realizar la gráfica con respecto al tiempo, o con respecto a cualquier magnitud con la que cuente el programa, incluso con ella misma, por lo que se pueden hacer infinidad de gráficas.

En la *x* se muestra el menú con las opciones que permite seleccionar Adams Postprocessor al abrir un archivo de demanda.





**Figura 53: Menú de opciones de un archivo de demanda.**

Para el modelo creado objeto del presente proyecto, las opciones disponibles para realizar las gráficas se representan en las *tablas 5 a 10*.

*Tabla 5: Opciones de representación de parámetros 1.*

	PARÁMETRO (REQUEST)		COMPONENTE (COMPONENT)
	IZQUIERDO (LEFT)	DERECHO (RIGHT)	
<b>COJINETES</b>	bgl_buje_frontal_1_disp bgl_buje_trasero_1_disp	bgr_buje_frontal_1_disp bgr_buje_trasero_1_disp	dx_(front/rear) dy_(front/rear) dz_(front/rear) dm_(front/rear) ax_(front/rear) ay_(front/rear) az_(front/rear) amag_(front/rear)
	bgl_buje_frontal_1_force bgl_buje_trasero_1_force	bgr_buje_frontal_1_force bgr_buje_trasero_1_force	fx_(front/rear) fy_(front/rear) fz_(front/rear) fm_(front/rear) tx_(front/rear) ty_(front/rear) tz_(front/rear) tm_(front/rear)
	bgl_buje_frontal_1_velo bgl_buje_trasero_1_velo	bgr_buje_frontal_1_velo bgr_buje_trasero_1_velo	vx_(front/rear) vy_(front/rear) vz_(front/rear) tm_(front/rear) tx_(front/rear) ty_(front/rear) tz_(front/rear) tm_(front/rear)

**Tabla 6: Opciones de representación de parámetros 2.**

	PARÁMETRO (REQUEST)		COMPONENTE (COMPONENT)
	IZQUIERDO (LEFT)	DERECHO (RIGHT)	
<b>AMORTIG.</b>	uel_PVD_frontal_1_data uel_PVD_trasera_1_data uel_SLD_amort_lat2_1_data uel_SLD_amor_laterales_1_data uel_SVD_amort_vertc_sec_1_data uel_SYD_anti_desvio_1_data	uer_PVD_frontal_1_data uer_PVD_trasera_1_data uer_SLD_amort_lat2_1_data uer_SLD_amor_laterales_1_data uer_SVD_amort_vertc_sec_1_data uer_SYD_anti_desvio_1_data	displacement_(front/rear) velocity_(front/rear) force_(front/rear)
<b>SUSPENSIONES</b>	uel_susp_frontal2_1_disp uel_susp_frontal_1_disp uel_susp_secundaria2_1_disp uel_susp_secundaria_1_disp uel_susp_trasera2_1_disp uel_susp_trasera_1_disp	uer_susp_frontal2_1_disp uer_susp_frontal_1_disp uer_susp_secundaria2_1_disp uer_susp_secundaria_1_disp uer_susp_trasera2_1_disp uer_susp_trasera_1_disp	dx_(front/rear) dy_(front/rear) dz_(front/rear) dm_(front/rear) ax_(front/rear) ay_(front/rear) az_(front/rear) amag_(front/rear)
	uel_susp_frontal2_1_force uel_susp_frontal_1_force uel_susp_secundaria2_1_force uel_susp_secundaria_1_force uel_susp_trasera2_1_force uel_susp_trasera_1_force	uer_susp_frontal2_1_force uer_susp_frontal_1_force uer_susp_secundaria2_1_force uer_susp_secundaria_1_force uer_susp_trasera2_1_force uer_susp_trasera_1_force	fx_(front/rear) fy_(front/rear) fz_(front/rear) fm_(front/rear) tx_(front/rear) ty_(front/rear) tz_(front/rear) tm_(front/rear)
	uel_susp_frontal2_1_velo uel_susp_frontal_1_velo uel_susp_secundaria2_1_velo uel_susp_secundaria_1_velo uel_susp_trasera2_1_velo uel_susp_trasera_1_velo	uer_susp_frontal2_1_velo uer_susp_frontal_1_velo uer_susp_secundaria2_1_velo uer_susp_secundaria_1_velo uer_susp_trasera2_1_velo uer_susp_trasera_1_velo	vx_(front/rear) vy_(front/rear) vz_(front/rear) tm_(front/rear) tx_(front/rear) ty_(front/rear) tz_(front/rear) tm_(front/rear)

**Tabla 7: Opciones de representación de parámetros 3.**

CONJUNTO DE RUEDAS eje 1 = w1 eje 2= w2	PARÁMETRO (REQUEST)		COMPONENTE (COMPONENT)
	IZQUIERDO (LEFT)	DERECHO (RIGHT)	
	ues_doble_rueda_1_(w1l/ w2l)_add_parameters_1	ues_doble_rueda_1_(w1r/ w2r)_add_parameters_1	derailment_quotient_(front/rear) wheel_unloading_(front/rear) longitudinal_creepage_(front/rear) lateral_creepage_(front/rear) spin_creepage_(front/rear) wear_number_(front/rear)
	ues_doble_rueda_1_(w1l/ w2l)_contact_force	ues_doble_rueda_1_(w1r/ w2r)_contact_force	long_creep_force_(front/rear) lat_creep_force_(front/rear) normal_force_(front/rear) lateral_force_(front/rear) vertical_force_(front/rear) friction_coeff_(front/rear)
	ues_doble_rueda_1_(w1l/ w2l)_contact_geometry	ues_doble_rueda_1_(w1r/ w2r)_contact_geometry	wpf_contact_point_(front/rear) rpf_contact_point_(front/rear) contact_angle_(front/rear) contact_ellipse_a_(front/rear) contact_ellipse_b_(front/rear) contact_ellipse_area_(front/rear) rolling_radius_(front/rear)
	ues_doble_rueda_1_(w1l/ w2l)_displacement	ues_doble_rueda_1_(w1r/ w2r)_displacement	angle_of_attack_(front/rear) rolling_angle_(front/rear) lateral_disp_(front/rear) vertical_disp_(front/rear) wheel_lift_(front/rear)

**Tabla 8: Opciones de representación de parámetros 4.**

CONJUNTO DE RUEDAS eje 1 = w1 eje 2= w2	PARÁMETRO (REQUEST)		COMPONENTE (COMPONENT)
	IZQUIERDO (LEFT)	DERECHO (RIGHT)	
	ues_doble_rueda_1_(w1l/ w2l)_equivalent_force	ues_doble_rueda_1_(w1r/ w2r)_equivalent_force	fx_(front/rear) fy_(front/rear) fz_(front/rear) fm_(front/rear) tx_(front/rear) ty_(front/rear) tz_(front/rear)
	ues_doble_rueda_1_(w1l/ w2l)_special parameters	ues_doble_rueda_1_(w1r/ w2r)_special parameters	derail_warning_(front/rear) track_distance_(front/rear) cp_number_(front/rear)
	ues_doble_rueda_1_(w1l/ w2l)_track_irregularity	ues_doble_rueda_1_(w1r/ w2r)_track_irregularity	track_distance_(front/rear) y_irregularity_(front/rear) z_irregularity_(front/rear) roll_irregularity_(front/rear)
	ues_doble_rueda_1_(w1l/ w2l)_velocity	ues_doble_rueda_1_(w1r/ w2r)_velocity	longitudinal_vel_(front/rear) lateral_vel_(front/rear) vertical_vel_(front/rear) rotacional_vel_(front/rear) ref_body_velocity_(front/rear)

*Tabla 9: Opciones de representación de parámetros 5.*

	PARÁMETRO (REQUEST)		COMPONENTE (COMPONENT)
	IZQUIERDO (LEFT)	DERECHO (RIGHT)	
<b>PARÁMETRO DE CONTROL</b>	controller_parameters		travelled_distance long_velocity long_acceleration traction_force
<b>ÁNGULO DE LA VÍA</b>	track_angle		roll_angle yaw_angle pitch_angle roll_angle_1st_derivate
<b>LÍNEA CENTRAL DE LA VÍA</b>	track_centerline		alpha_tot alpha_plant track_base track_centerline_x track_centerline_y track_centerline_z
<b>IRREGULARIDAD DE LA VÍA</b>	track_irregularities_disp		(left/right )_z_input (left/right )_y_input roll_input

*Tabla 10: Opciones de representación de parámetros 6.*

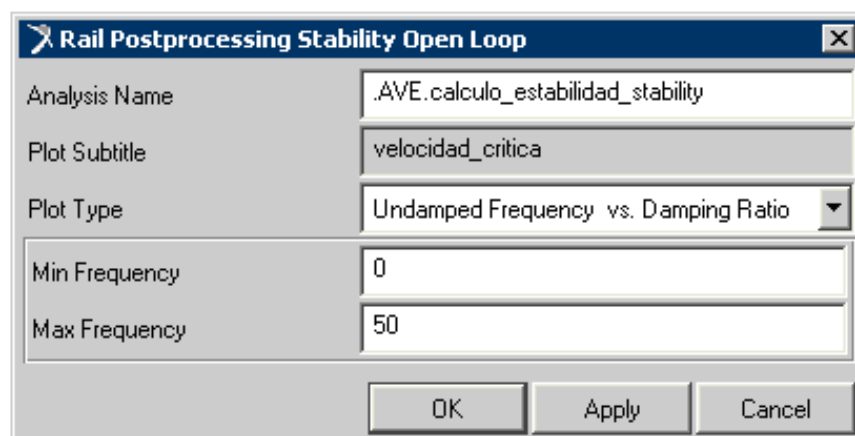
	PARÁMETRO (REQUEST)		COMPONENTE (COMPONENT)
	IZQUIERDO (LEFT)	DERECHO (RIGHT)	
<b>RAÍLES DE LA VÍA</b>	track_rails		(left/right )_x (left/right )_y (left/right )_z
<b>CONJUNTO DE RUEDAS EJE 1 = WST1 EJE 2 = WST2</b>	Ues_doble_rueda_1__(wst1/ wst2)_wheelset_disp		track_distance_(front/rear) lateral_(front/rear) vertical_(front/rear) angle_of_attack_(front/rear)
	ues_doble_rueda_1__(wst1/ wst2)_wheelset_force		longitudinal_(front/rear) lateral_(front/rear) vertical_(front/rear)

### 7.4.2 PROCESO PARA REALIZAR LA GRÁFICA UN CÁLCULO DE ESTABILIDAD

Al cargar el archivo de demanda de un cálculo de estabilidad hay que indicar qué es lo que se quiere representar. Para representar las gráficas que permitan obtener la velocidad crítica, en la barra de menú se selecciona los comandos *PostProcessing*, *Stability Toolkit* y en el cuadro emergente que aparece se introduce:

- **Analysis Name:** se elige el nombre del análisis de estabilidad realizado, en este caso *calculado\_estabilidad*.
- **Plot Subtitle:** se le asigna un nombre a la gráfica. En este caso se le va a llamar *velocidad\_crítica*.
- **Plot Type:** es el tipo de gráfico que se desea generar. Especificar si se desea trazar *undamped frequency vs damping ratio* (frecuencia amortiguada contra el factor de amortiguamiento expresado en %) o *real part vs imaginary part* (parte imaginaria de los modos propios contra su parte real). Se marca en este caso *undamped frequency vs damping ratio*.
- **Min Frequency:** es la frecuencia mínima. De esta forma se introduce un rango de frecuencias para excluir los modos sobreamortiguado y los modos de alta frecuencia. En este caso se introduce 0.
- **Max Frequency:** es la frecuencia máxima. En este caso 50.

En la *figura 54* se muestra el menú emergente que aparece en Adams Postprocessor para generar un cálculo de estabilidad.



**Figura 54:** Menú para generar el cálculo de estabilidad.



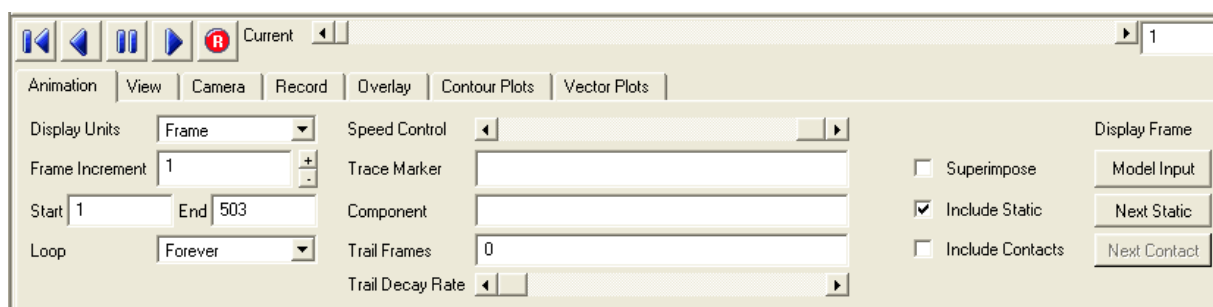
En el menú de vista en árbol se puede seleccionar los diferentes gráficos que genera el programa automáticamente tras realizar este paso.

## 7.5 VISUALIZACIÓN DE UN ARCHIVO DE GRÁFICOS

Adams Postprocessor permite crear una animación de la simulación calculada dependiente del tiempo, permitiendo variar la posición, la velocidad de simulación, orientación etc. Además se permite grabar dicha simulación. Al abrir el archivo *Graphics Files*, aparece una ventana de comandos con múltiples opciones de simulación, destacándose las siguientes:

- **Animation:** indica diferentes opciones de simulación como la velocidad, el número de pasos, etc.
- **View:** para ver el modelo de una forma visual diferente. Permite dar brillo, efectos de sombras, etc.
- **Camera:** permite diferentes opciones de cámara donde se desea enfocar.
- **Record:** para grabar el vídeo en diferentes formatos y posibilidades.
- **Overlay:** permite abrir diferentes archivos de simulación y animarlos a la vez.
- **Contour plots:** para insertar una leyenda con los componentes de las fuerzas entre otras posibilidades.
- **Vector plots:** vectores de dibujo.

En la *figura 55* se muestra el menú con las opciones disponibles al abrir un archivo gráfico con Adams Postprocessor.



**Figura 55: Menú de opciones de un archivo gráfico.**

Por tanto, con Adams Postprocessor se puede recrear el movimiento del vehículo y comprobar cómo van variando los parámetros que se requieran. En la figura se muestra una imagen del entorno gráfico de esta herramienta. Hay que mencionar que en la simulación sólo se representan los bogies, no el modelo completo del ensamblaje del bogie más la carrocería.



# Capítulo 8

## Resultados de las simulaciones

## 8.1 INTRODUCCION

Como se ha descrito en el presente proyecto, empleando el modelo del tren Avant serie S-104 creado, se han realizado diferentes cálculos con Adams Rail. La documentación generada por este software es demasiado amplia para ser reflejada en su totalidad en esta memoria, por lo que vendrá incluida en el CD adjunto a este proyecto.

Por otro lado Adams Postprocessor permite obtener gráficas con los resultados obtenidos en Adams Rail al realizar un análisis dinámico, representando los parámetros en multitud de combinaciones posibles. No obstante, se describen a continuación algunos de estos parámetros que se han considerado más importantes, para poder valorar la idoneidad del modelo creado.

Como para los análisis que vamos a realizar, únicamente afecta el cambio de la conicidad al análisis dinámico, el análisis de precarga y lineal será el mismo para todas las conicidades y por tanto solo se realizará una única vez.

## 8.2 ANÁLISIS PRECARGA

Este análisis permite obtener los valores de las cargas en cada uno de los elementos del sistema de suspensión antes de empezar la simulación (las precargas). Mediante este análisis se pueden detectar problemas derivados de configuraciones asimétricas, que producirían una distribución de cargas distintas en elementos que se consideran como iguales. Gracias al análisis de precarga se comprueba que, tanto la operación de ensamblado como la definición de las propiedades de los componentes, se han llevado a cabo con éxito. Por tanto, el análisis de precarga es el primer análisis que hay que realizar antes de llevar a cabo los demás, ya sea análisis lineal, dinámico o de estabilidad, porque nos va a indicar los problemas ejecutados en el diseño de nuestro vehículo que pueden dar lugar a incoherencias o resultados de simulaciones incorrectos.

Adams Rail calcula las fuerzas de precarga mediante la distribución de masas aplicada al modelo y, una vez obtenidas, las aplica directamente a cada elemento de la suspensión. Puede ocurrir que después de realizar este análisis y que se hayan aplicado las precargas en cada uno de los elementos de la suspensión, la simetría del modelo desaparezca. Un mal reparto de las masas hace que unos elementos de la suspensión se carguen más que otros y la simetría que poseía el vehículo antes de realizar el análisis, se rompa, apareciendo la disimetría [27].

Durante la ejecución de la simulación del modelo creado se ha comprobado que el reparto de cargas mantiene prácticamente la simetría (aproximadamente 91 %) , por lo que el modelo está perfectamente construido. Como hemos comentado anteriormente , se ha comprobado también, que el análisis es independiente de la conicidad de nuestras

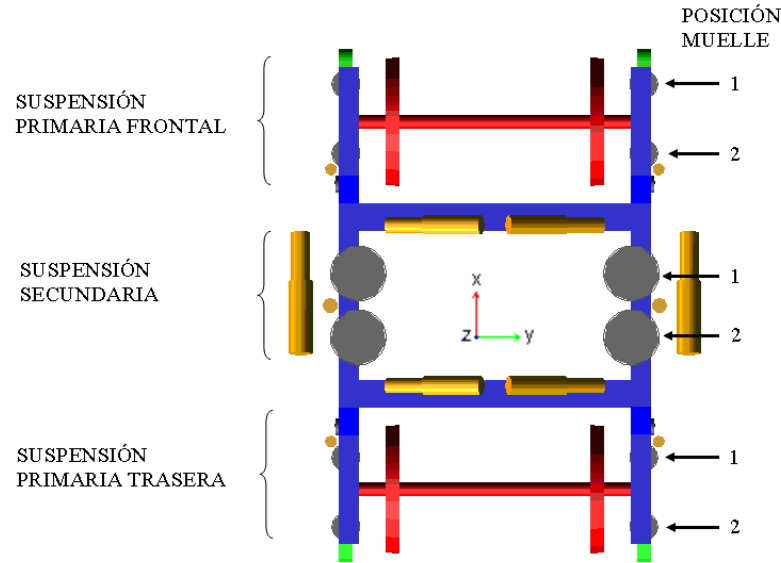
ruedas, así que los resultados expuestos en la *tabla 11* y la *figura 55* son idénticos para las demás conicidad de interés para el presente proyecto.

En la *tabla 11* se muestran los resultados obtenidos del reparto de cargas mediante el cálculo de precarga, en este caso es para una conicidad de  $1/10$  pero como hemos comentado, obtenemos el mismo resultado para las demás conicidad.

**Tabla 11: Resultados precarga**

REPARTO DE CARGA [N]				
BOGIE	TIPO DE SUSPENSIÓN	POSICIÓN DEL MUELLE	LADO	
			DERECHO	IZQUIERDO
<b>DELANTERO</b>	Suspensión primaria frontal	1	43.279,10	47.038,80
		2	23.522,60	25.566,00
	Suspensión primaria trasera	1	23.517,00	25.560,50
		2	43.268,70	47.028,40
	Suspensión secundaria	1	75.041,00	82.763,30
		2	82.652,10	74.929,90
<b>TRASERO</b>	Suspensión primaria frontal	1	41555,10	45.314,80
		2	22.585,50	24.629,00
	Suspensión primaria trasera	1	22.580,00	24.623,40
		2	41.544,70	45.304,40
	Suspensión secundaria	1	71.792,30	79.514,60
		2	79.403,40	71.681,20

Las indicaciones de la posición que ocupa cada resorte en el modelo creado se pueden consultar en la *figura 56*.



*Figura 56: Posición de los resortes*

### 8.3 ANÁLISIS LINEAL

Todo sistema con masa y rigidez puede vibrar, por lo que a partir de un análisis lineal se pueden obtener un análisis modal del modelo ensamblado, es decir, los autovalores, los modos propios de vibración y las frecuencias naturales a las que se producen, aunque de forma general las ecuaciones que determinan la respuesta dinámica no son excesivamente lineales. Para la obtención de los valores buscados el programa restringe el movimiento de todos los ejes y las ruedas del vehículo asociándolas a tierra mediante uniones fijas [27].

Para la representación de la expresiones dinámicas del movimiento de nuestro vehículo se puede utilizar de forma general las siguientes ecuaciones:

$$f(X, \dot{X}, \ddot{X}) = U(t) \quad \text{ec. 19}$$

A partir de esta expresión se representa cómo el vector de excitaciones exteriores  $U(t)$  depende del vector fuerza, el cual está definido en función del desplazamiento, velocidad y aceleración asociados a los grados de libertad del vehículo.

Si se consideran la existencia de pequeños desplazamientos con respecto a la posición de equilibrio la ecuación queda:

$$f(X_0, \dot{X}_0, \ddot{X}_0) + \frac{\delta f}{\delta X} \Delta X + \frac{\delta f}{\delta \dot{X}} \Delta \dot{X} + \frac{\delta f}{\delta \ddot{X}} \Delta \ddot{X} = U_0 + \Delta U(t) \quad \text{ec. 20}$$

Teniendo en cuenta que el subíndice “0” representa la posición de equilibrio, y que ésta corresponde con la posición de referencia, la ecuación anterior queda:

$$\frac{\delta f}{\delta X} \Delta X + \frac{\delta f}{\delta \dot{X}} \Delta \dot{X} + \frac{\delta f}{\delta \ddot{X}} \Delta \ddot{X} = \Delta U(t) \quad \text{ec. 21}$$

Si se considera:

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{x} ; \Delta \mathbf{U} = \mathbf{u} ; \frac{\delta f}{\delta \mathbf{X}} = \mathbf{K} ; \frac{\delta f}{\delta \dot{\mathbf{x}}} = \mathbf{C} ; \frac{\delta f}{\delta \ddot{\mathbf{x}}} = \mathbf{M} \quad ec. 22$$

Se llega a la ecuación linealizada del movimiento:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}\} = \{\mathbf{u}(t)\} \quad ec. 23$$

En donde:

$[\mathbf{M}]$ = Matriz de masa.

$[\mathbf{C}]$ = Matriz de amortiguamiento.

$[\mathbf{K}]$ = Matriz de rigidez

Para obtener la nueva base de las matrices, formada por autovectores del sistema amortiguado, se calculan los autovectores y autovalores de la ecuación del movimiento linealizada para una vibración libre amortiguada. Esta ecuación es la siguiente:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}\} = \mathbf{0} \quad ec. 24$$

Empleando el siguiente vector definido como:

$$\{\mathbf{y}\} = \left\{ \begin{matrix} \{\dot{\mathbf{x}}\} \\ \{\mathbf{x}\} \end{matrix} \right\} \quad ec. 25$$

Y reescribiendo la ecuación linealizada del movimiento de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{0}] & [\mathbf{M}] \\ [\mathbf{M}] & [\mathbf{C}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\ddot{\mathbf{x}}\} \\ \{\dot{\mathbf{x}}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -[\mathbf{M}] & [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{0}] & [\mathbf{K}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\dot{\mathbf{x}}\} \\ \{\mathbf{x}\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{0}\} \\ \{\mathbf{0}\} \end{Bmatrix} \quad ec. 26$$

Se escribe la ecuación anterior como:

$$[\mathbf{A}] \cdot \{\dot{\mathbf{y}}\} + [\mathbf{B}] \cdot \{\mathbf{y}\} = \{\mathbf{0}\} \quad ec. 27$$

Si se multiplica ambos términos por la inversa de “A”:

$$\{\dot{\mathbf{y}}\} - [\mathbf{H}] \cdot \{\mathbf{y}\} = \{\mathbf{0}\} \quad ec. 28$$

Donde:

$$[\mathbf{H}] = -[\mathbf{A}]^{-1} \cdot [\mathbf{B}] \quad ec. 29$$

Buscando soluciones para la ecuación 28 de la forma:

$$\{y\} = \{\psi\} \cdot e^{-\gamma t} \quad ec. 30$$

Donde “ $\gamma$ ” es un número complejo y  $\{\psi\}$  es el vector modal constituido por elementos complejos. Sustituyendo en la ecuación 28, se obtiene:

$$|\gamma[I] - [H]| \cdot \{\psi\} = \{0\} \quad ec. 31$$

Siendo:

$[I]$  = matriz identidad.

Por lo tanto la ecuación característica del sistema es:

$$|\gamma[I] - [H]| = \{0\} \quad ec. 32$$

Solucionando la ecuación característica, se obtienen las raíces “ $\gamma_i$ ”, las cuales, representan “ $2n$ ” autovalores complejos conjugados. Sustituyendo las raíces obtenidas en la ecuación 30, se obtiene sus correspondientes autovectores complejos conjugados.

Por consiguiente, cuando uno ó más autovalores tomen el valor cero, el autovector se corresponde a un modo de vibración de un cuerpo rígido. Es decir, se comporta como un sólido rígido sin que exista deformación de los componentes elásticos.

Para revisar los resultados del análisis lineal conseguidos con el programa Adams Rail se emplea el menú Control Lineal de Modos (*Linear Modes Controls*) tal y como se ha descrito en el apartado correspondiente.

En la *tabla 12* se observan los resultados conseguidos. La parte imaginaria representa el comportamiento oscilatorio del modo de vibración, mientras su parte real representa su amortiguamiento característico. Los modos de vibración cuya parte imaginaria sea igual a cero, se comportarán como un sólido rígido, mientras que los restantes autovalores se corresponden con los modos propios de vibración. En el presente proyecto los modos propios de vibración son los modos del 30 al 42.



**Tabla 12: Resultado análisis lineal**

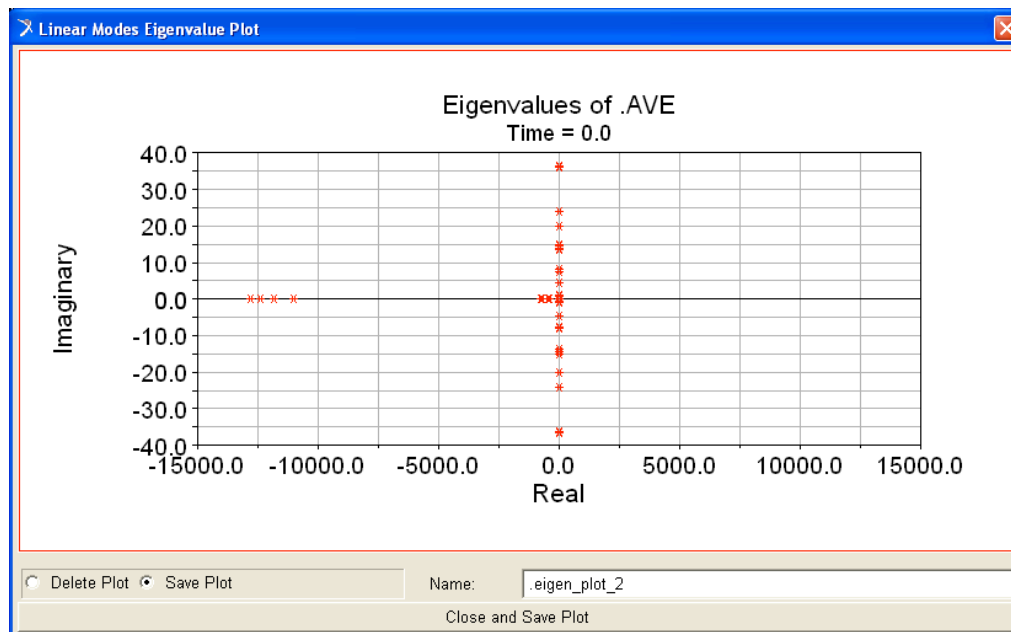
EIGEN VALUES (Time = 0.0)

FREQUENCY UNITS: (Hz)

MODE NUMBER	UNDAMPED NATURAL FREQUENCY	DAMPING RATIO	REAL	IMAGINARY
1	0.000000E+000	0.000000E+000	0.000000E+000	0.000000E+000
2	0.000000E+000	0.000000E+000	0.000000E+000	0.000000E+000
3	2.894620E-011	0.000000E+000	-2.894620E-011	0.000000E+000
4	9.398090E-003	1.000000E+000	-9.398090E-003	0.000000E+000
5	2.498050E-002	1.000000E+000	-2.498050E-002	0.000000E+000
6	2.514450E-002	1.000000E+000	-2.514450E-002	0.000000E+000
7	1.317580E-001	1.000000E+000	-1.317580E-001	0.000000E+000
8	2.316160E-001	1.000000E+000	-2.316160E-001	0.000000E+000
9	1.060510E+000	1.000000E+000	-1.060510E+000	0.000000E+000
10	1.174070E+000	1.000000E+000	-1.174070E+000	0.000000E+000
11	1.208510E+000	1.000000E+000	-1.208510E+000	0.000000E+000
12	1.631990E+000	1.000000E+000	-1.631990E+000	0.000000E+000
13	1.869070E+000	1.000000E+000	-1.869070E+000	0.000000E+000
14	3.760380E+000	1.000000E+000	-3.760380E+000	0.000000E+000
15	4.632520E+000	1.000000E+000	-4.632520E+000	0.000000E+000
16	4.634320E+000	1.000000E+000	-4.634320E+000	0.000000E+000
17	5.878280E+000	1.000000E+000	-5.878280E+000	0.000000E+000
18	4.001310E+002	1.000000E+000	-4.001310E+002	0.000000E+000
19	4.602840E+002	1.000000E+000	-4.602840E+002	0.000000E+000
20	7.310740E+002	1.000000E+000	-7.310740E+002	0.000000E+000
21	7.820760E+002	1.000000E+000	-7.820760E+002	0.000000E+000
22	1.102120E+004	1.000000E+000	-1.102120E+004	0.000000E+000
23	1.102120E+004	1.000000E+000	-1.102120E+004	0.000000E+000
24	1.182190E+004	1.000000E+000	-1.182190E+004	0.000000E+000
25	1.182200E+004	1.000000E+000	-1.182200E+004	0.000000E+000
26	1.239900E+004	1.000000E+000	-1.239900E+004	0.000000E+000
27	1.239900E+004	1.000000E+000	-1.239900E+004	0.000000E+000
28	1.282310E+004	1.000000E+000	-1.282310E+004	0.000000E+000
29	1.282360E+004	1.000000E+000	-1.282360E+004	0.000000E+000
30	6.136058E-001	1.910282E-001	-1.172160E-001	+/- 6.023060E-001
31	1.128614E+000	3.713288E-001	-4.190870E-001	+/- 1.047920E+000
32	4.900526E+000	3.814672E-001	-1.869390E+000	+/- 4.529960E+000
33	7.966822E+000	3.276162E-001	-2.610060E+000	+/- 7.527140E+000
34	8.371632E+000	2.343211E-001	-1.961650E+000	+/- 8.138560E+000
35	1.378154E+001	9.939236E-002	-1.369780E+000	+/- 1.371330E+001
36	1.379863E+001	9.997011E-002	-1.379450E+000	+/- 1.372950E+001
37	3.853395E+001	9.270136E-001	-3.572150E+001	+/- 1.445130E+001
38	3.874394E+001	9.220538E-001	-3.572400E+001	+/- 1.499630E+001
39	2.700778E+001	6.696479E-001	-1.800570E+001	+/- 2.005810E+001
40	2.998722E+001	6.004257E-001	-1.800510E+001	+/- 2.398020E+001
41	3.657109E+001	1.350004E-001	-4.937110E+000	+/- 3.623630E+001
42	3.682437E+001	1.245344E-001	-4.585900E+000	+/- 3.653770E+001

Los modos inestables de vibración son aquellos que tienen la parte real del autovalor positiva. En este caso, no se obtiene ninguno con parte real positiva, es decir, son todos estables

El programa también nos permite ver la representación de cada uno de los números imaginarios obtenidos con la opción *eigenvalue* (autovalor), tal y como se representa en la *figura 57*:



**Figura 57: Autovalores del análisis lineal**

Adams Rail permite ver además la animación de estos modos (*animate the displayed modes*). El vídeo de estas animaciones se ha añadido al CD adjunto a presente proyecto. En la *figuras 58 y 59*, se representan la simulación del modo 1 y 2 del tren tipo Avant serie S-104 que ha sido objeto de modelado en este proyecto.

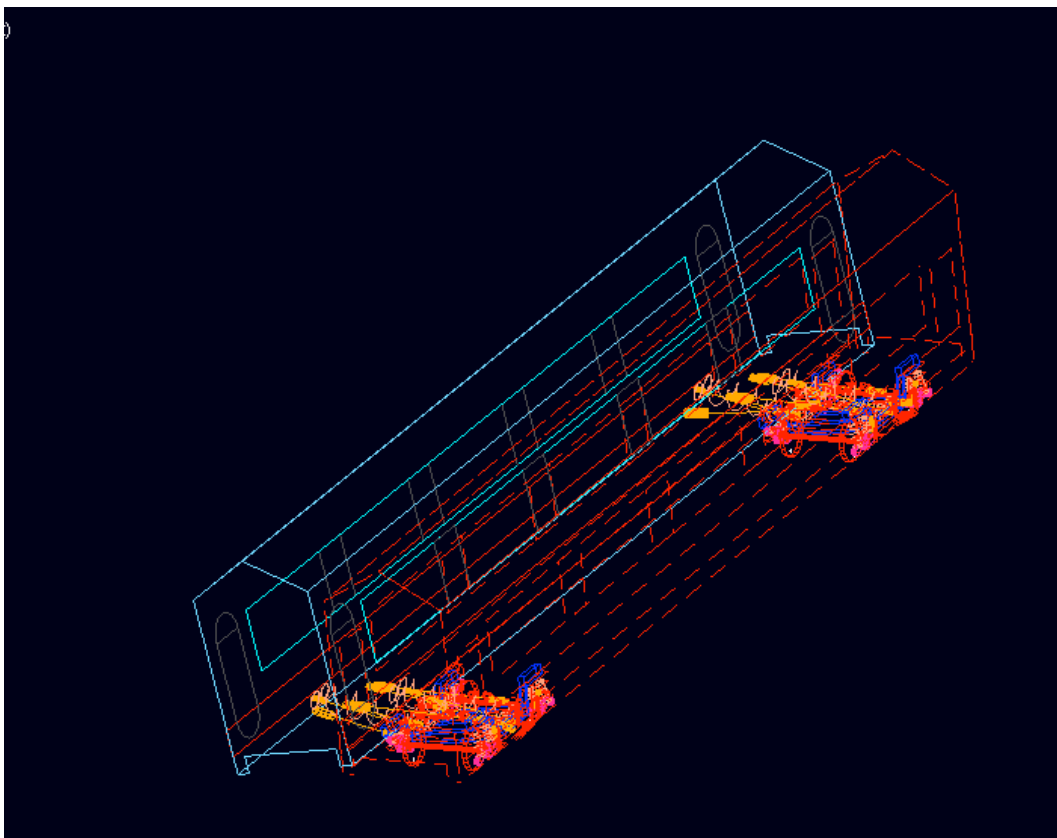


Figura 58: Primer modo (número 30 de la tabla 12).

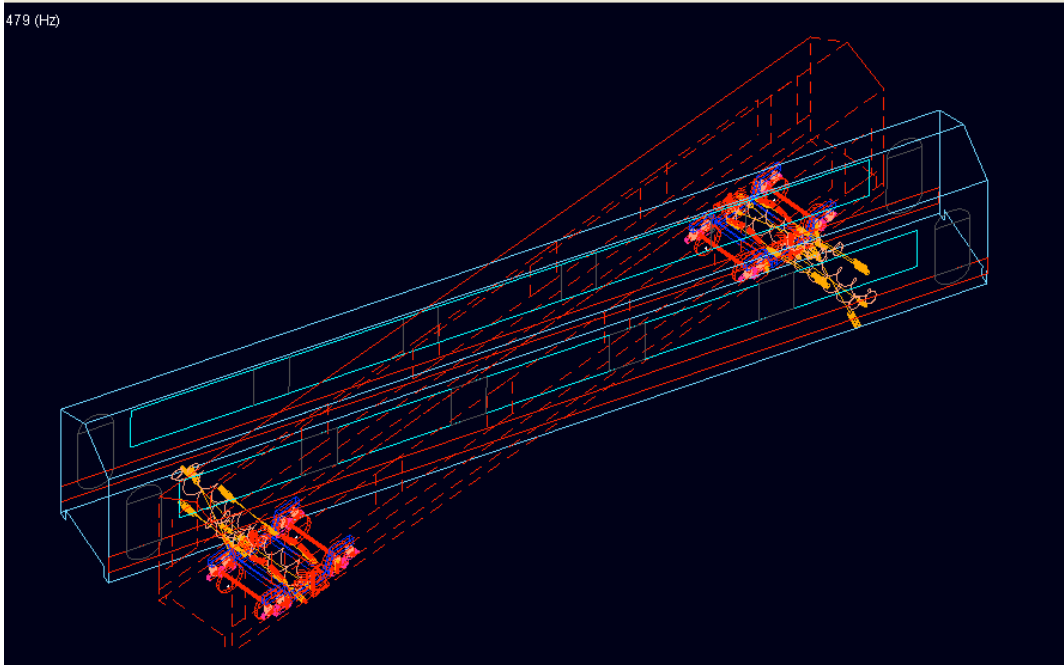
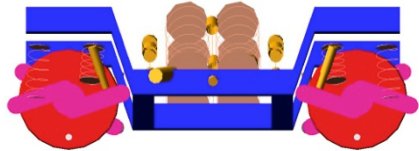

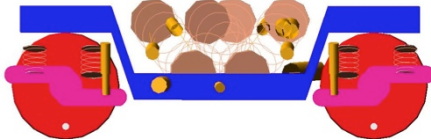

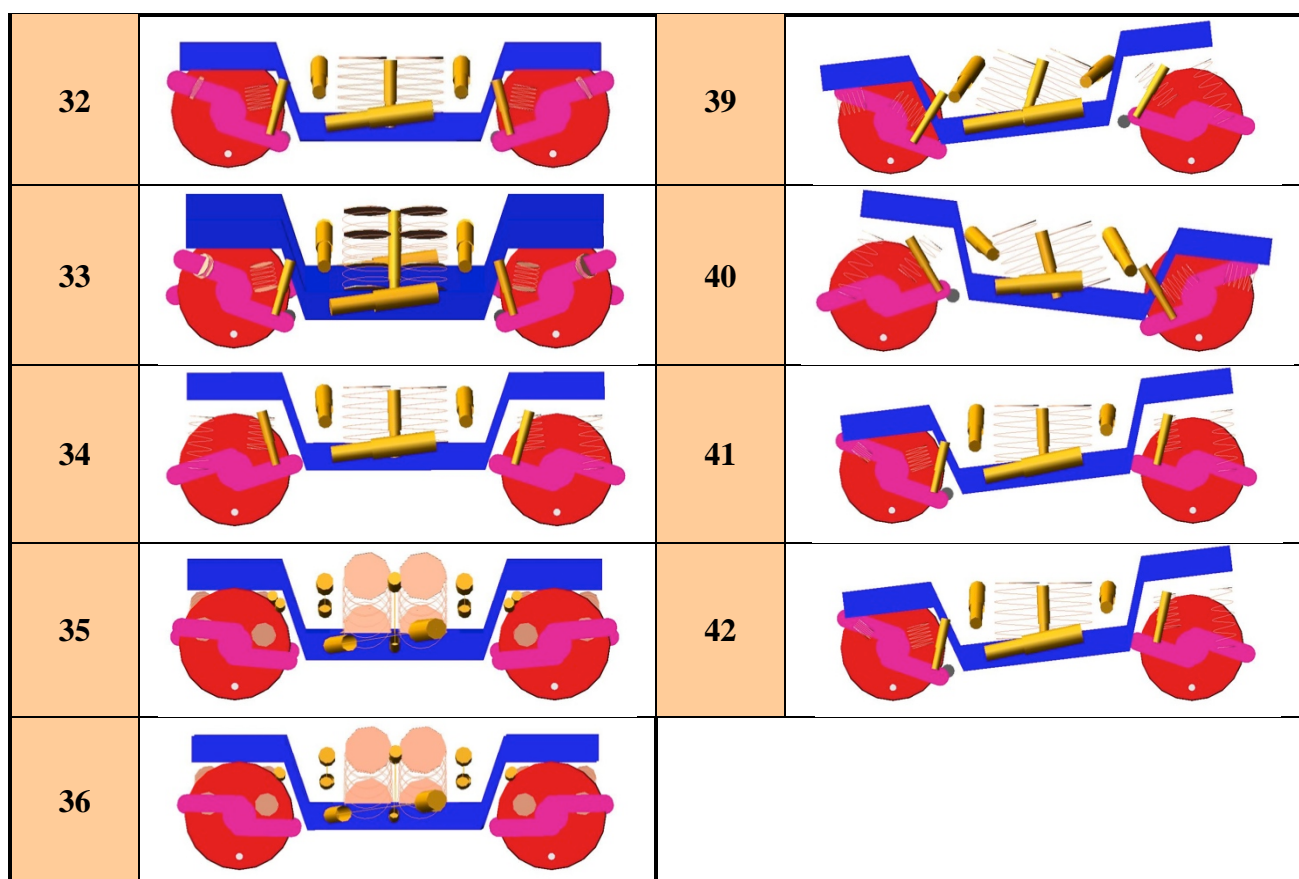


Figura 59: Segundo modo (número 31 de la tabla 12).

Como se puede observar, la ilustración de los modos propios del vehículo completo, resulta difícil de analiza, por ello, se ha realizado un zoom en el bogie frontal y se ha puesto como invisible el vagón para, de esta manera, tener una visión más clara de cada modo. Se representa a continuación, en la *tabla 13*, las imágenes de estas animaciones.

Tabla 13: Modos propios de vibración del bogie frontal.

ANÁLISIS LINEAL - MODOS EN ADAMS RAIL			
Nº MODO	RESULTADO	Nº MODO	RESULTADO
30		37	
31		38	



## 8.4 ANÁLISIS DINÁMICO

El análisis dinámico se utiliza para realizar un estudio de un vehículo en movimiento. Se puede utilizar el análisis dinámico para determinar el comportamiento en curva, el descarrilamiento, el estudio del confort y la estabilidad. Teniendo en cuenta los resultados del análisis obtenido, se puede alterar las propiedades de rigidez de sus suspensiones, la característica de sus amortiguadores, cambiar las propiedades de las ruedas, en nuestro caso la conicidad y analizar el modelo diseñado de nuevo para evaluar los efectos de dichas alteraciones con la ventaja de no tener que construir prototipos, lo que provocaría elevadísimos costes.

En el presente proyecto se va a realizar el análisis del comportamiento dinámico del tren Avant serie S-104, para las conicidades anteriormente comentadas,  $1/10$ ,  $1/20$ ,  $1/30$ ,  $1/40$ ,  $1/50$  y *rueda plana*, a velocidades de 20 y 30 m/s y en tramos recto y curvo. Más adelante expondremos las características de cada tramo de vía.

Tras realizar el cálculo dinámico, es necesario emplear Adams Postprocessor para poder representar las gráficas deseadas. Hay que mencionar que el programa permite graficar una amplia variedad de parámetros en multitud de combinaciones, como se ha descrito en el apartado correspondiente de la presente memoria.

Se representa a continuación algunas de estas gráficas que se han considerado más importante para entender los resultados obtenidos. Se han representado para cada hipótesis de cálculo los siguientes parámetros:

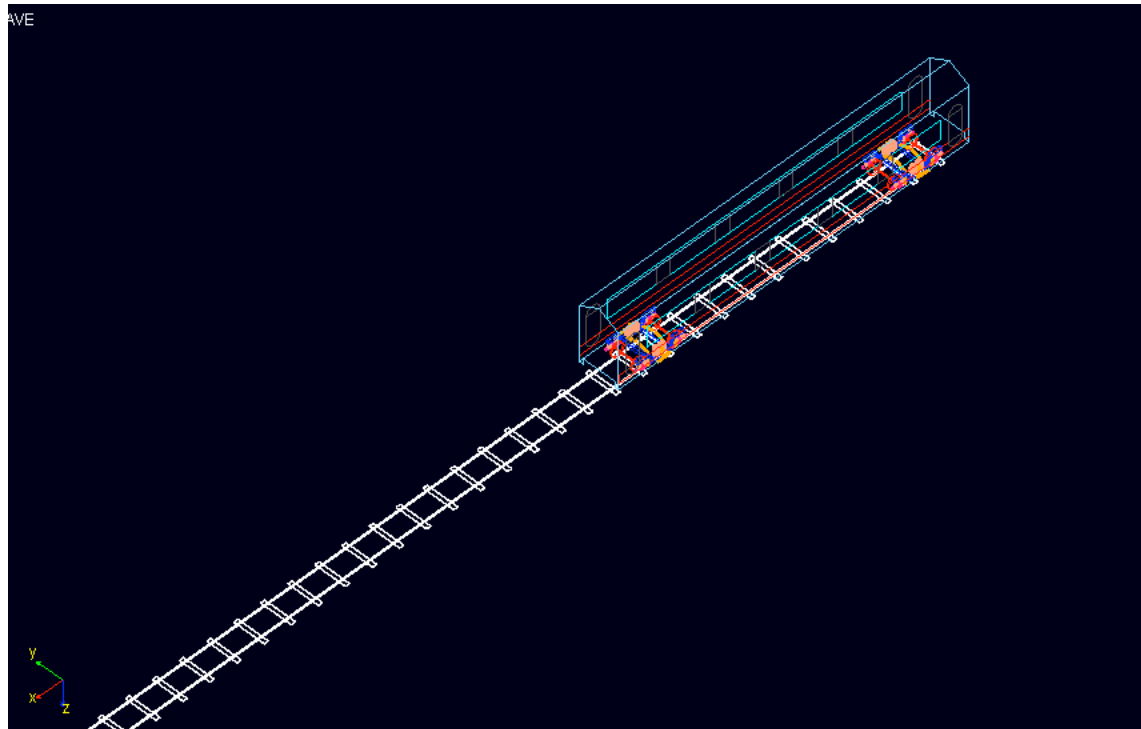
- Parámetros de control:
  - Aceleración.
  - Velocidad.
- Desplazamientos:
  - Desplazamiento lateral.
  - Desplazamiento vertical.
- Fuerzas:
  - Fuerza  $F_x$ .
  - Fuerza  $F_y$ .
  - Fuerza  $F_z$ .
- Momentos:
  - Momento  $T_x$ .
  - Momento  $T_y$ .
  - Momento  $T_z$ .

El punto de referencia para el cual vamos a obtener los resultados es el centro de la rueda izquierda, del eje frontal, del bogie delantera. La idea es obtener los resultados cerca de la caja de grasa del bogie, pero el software MSC. Adams Rail no trae por defecto *Request* en dicha zona, por lo que habría que crearlo no siendo este el propósito del presente proyecto fin de carrera, por consiguiente la zona más próxima, cuyos resultados obtenidos son más cercanos a los de la caja de grasa, es la zona centro de la rueda.

### 8.4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

La vía modelada tiene una longitud de 1000 metros. No obstante, hay que tener en cuenta que el vagón no recorre toda la longitud de la vía ya que la simulación tiene que parar antes de que las ruedas del bogie delantero lleguen al final de la vía, si no, el programa lo considera como descarrilamiento al no estar todas las ruedas sobre el raíl. Por este motivo se puede apreciar que en realidad el vagón no recorre 1000 m, sino 800 m, que es la distancia que recorrería un punto concreto del modelo. Esto se logra programando un tiempo de simulación adecuado, teniendo en cuenta la velocidad de marcha.

En la *figura 60* se representa el vagón sobre el rail en la simulación dinámica.



*Figura 60: Vagón sobre rail en simulación dinámica.*

Para interpretar los resultados que se presentan a continuación, hay que tener en cuenta el sentido de los ejes:

- Z positivo hacia abajo.
- X positivo en el sentido de la marcha.
- Y será consecuencia de la dirección del eje Z y del X.

#### **CONTACTO RUEDA-RAIL**

Las simulaciones que vamos a realizar con las distintas conicidades, se harán con el mismo archivo propiedades de configuración de contacto, las cuales están representadas en la *figura 61*.

```

[MDI_HEADER]
FILE_TYPE      = 'ccf'
FILE_VERSION   = 1.0
FILE_FORMAT    = 'ASCII'

$-----UNITS
[UNITS]
LENGTH          = 'meter'
FORCE           = 'newton'
ANGLE           = 'radians'
MASS            = 'kg'
TIME            = 'second'

$-----MODEL
[MODEL]
CONFIG_TYPE     = 'STANDARD'
CONFIG_MODE     = 1
CONFIG_FORMAT   = 'STANDARD'

$-----CONFIGURATION
[CONFIGURATION]
{ track_x      ctc_type }
  0.0          1
  5000.0       1

$-----CONTACT_1
[CONTACT_1]
TYPE           = 'WRTAB'
MODE           = 1
FORMAT         = 'CTC_1'
CTB_CALC_METHOD = 'VARIABLE_STEP'
CTB_LATERAL_DISP_INC = 0.001
CTB_STEPS_NUMBER = 16
VERTICAL_STIFFNESS_HERTZ = 1.0E9
VERTICAL_DAMPING_HERTZ = 1e4
MUX_TYPE       = 'CONSTANT'
MUX            = 0.4
MUWY_TYPE      = 'CONSTANT'
MUWY_REF       = 'RAIL'
MUWY           = 1
MUWX_TYPE      = 'CONSTANT'
MUWX           = 1
DERAIL_Y       = -0.045
KALKER_FACTOR  = 1.0
CREEP_FORCE_CALC_METHOD = 'FASTSIM'
MXFSIM         = 10
MYFSIM         = 11
    
```

**Figura 61: Propiedades de contacto.**

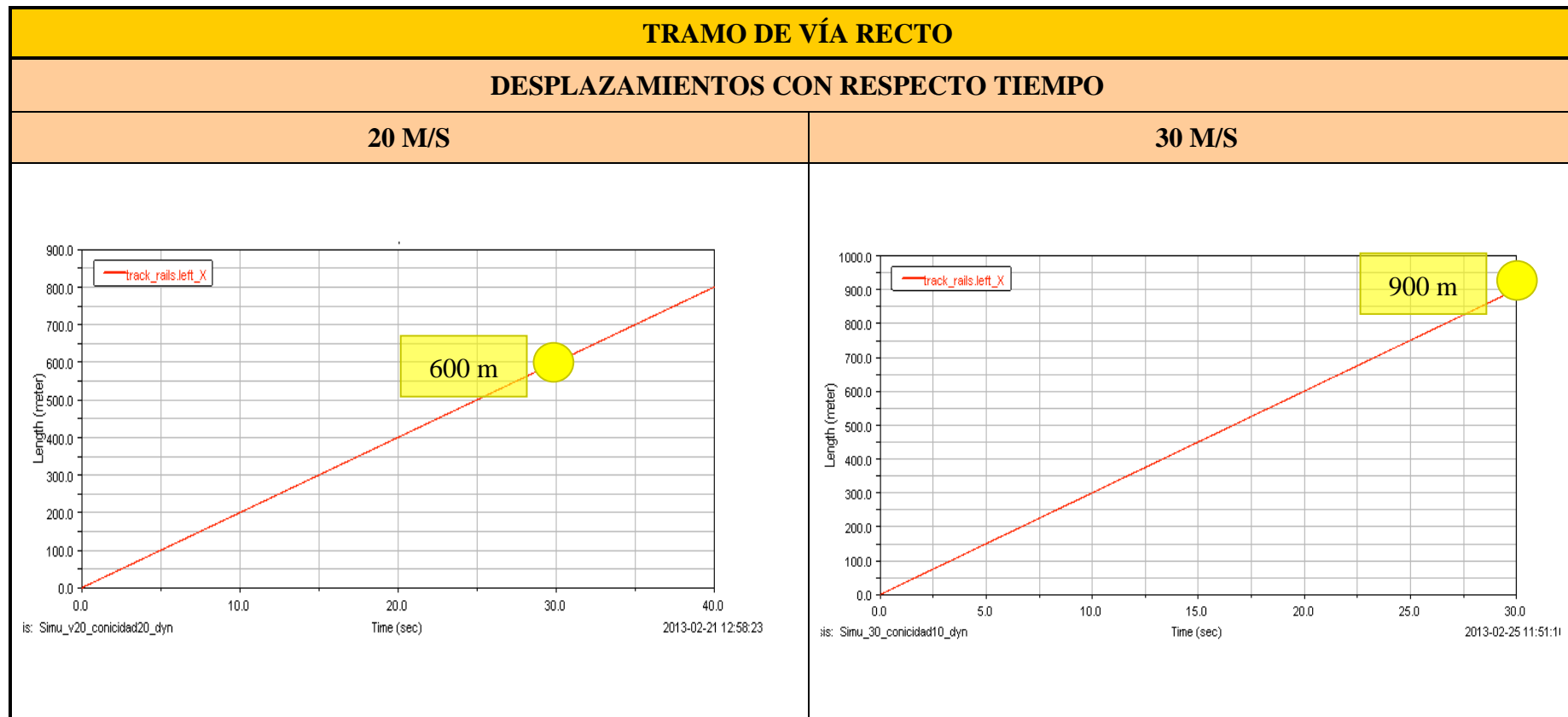
## **DESPLAZAMIENTO CON RESPECTO AL TIEMPO**

Las gráficas de la distancia recorrida por el vagón en función del tiempo se representan en la *tabla 14*. El eje de abscisas representa al tiempo y el eje de ordenadas la longitud de la vía X, en concreto el raíl izquierdo (*track rail left X*), en metros, no existiendo variaciones significativas entre un raíl y otro

Se puede apreciar que para recorrer una distancia de 800 m a 20 m/s se emplea 40 segundos, y a 30 m/s se emplea 26 segundos. La variación de esta gráfica considerando trazado recto o curvo es inapreciable y no ha representado



*Tabla 14: Tramo de vía recto recorrido.*

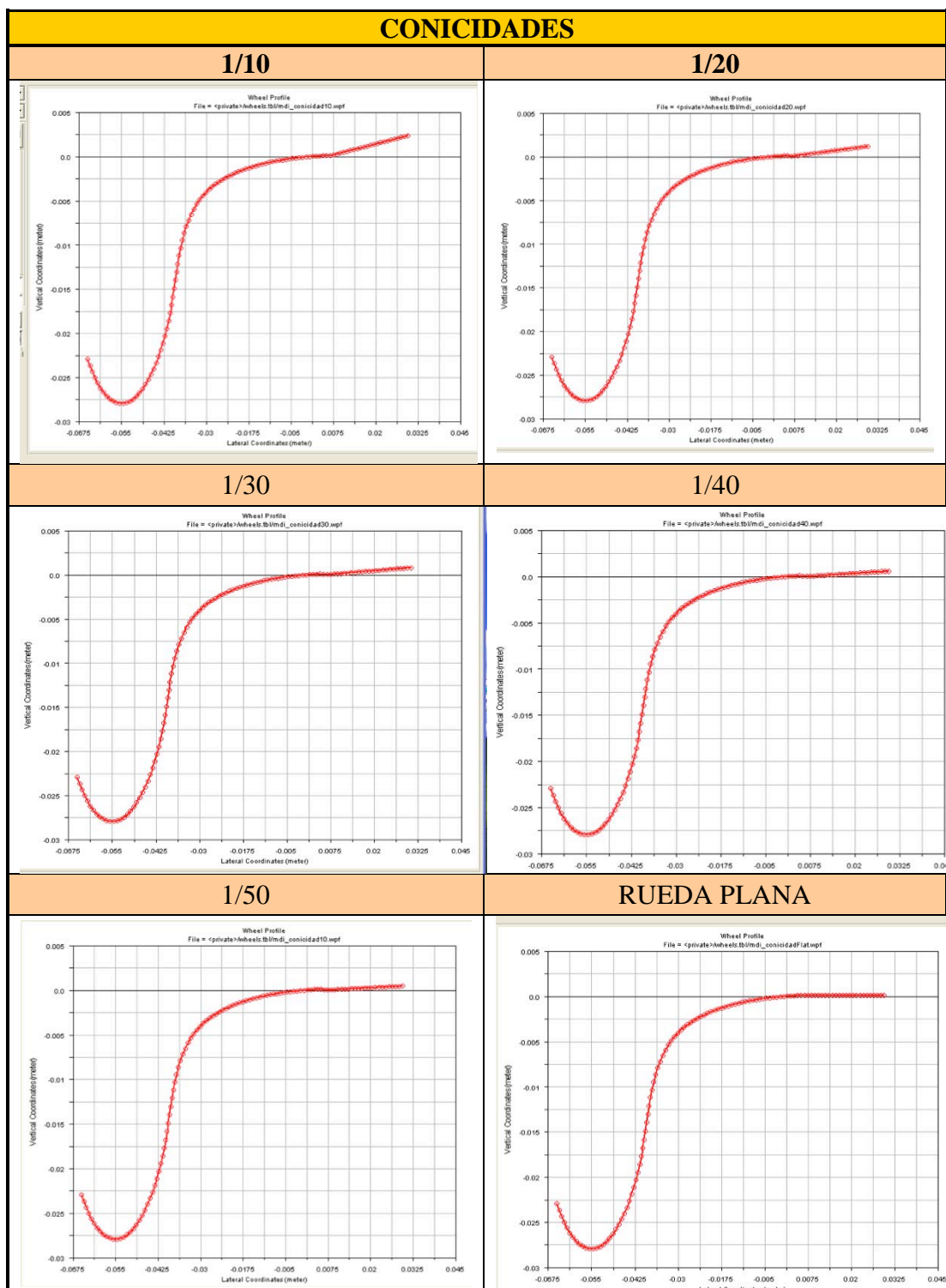




## CONICIDADES

Recopilando la información del capítulo 6, vamos a recordar las conicidades que vamos a utilizar para realizar las simulaciones. Estas están representadas en la *tabla 15*. Para verla con mas detalle volver al capítulo 6.

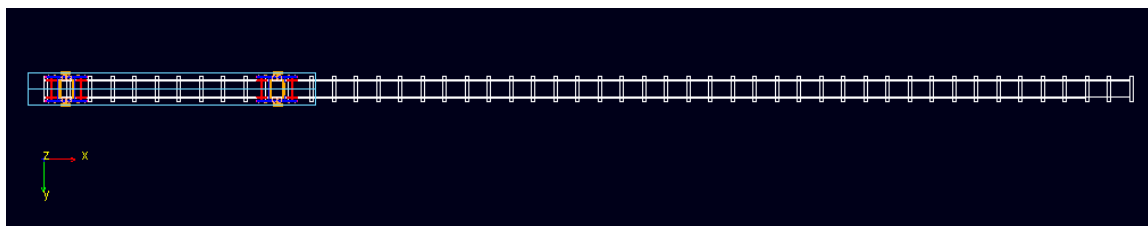
**Tabla 15: Conicidades usadas en las simulaciones**



## 8.4.2 SIMULACIÓN EN VÍA RECTA

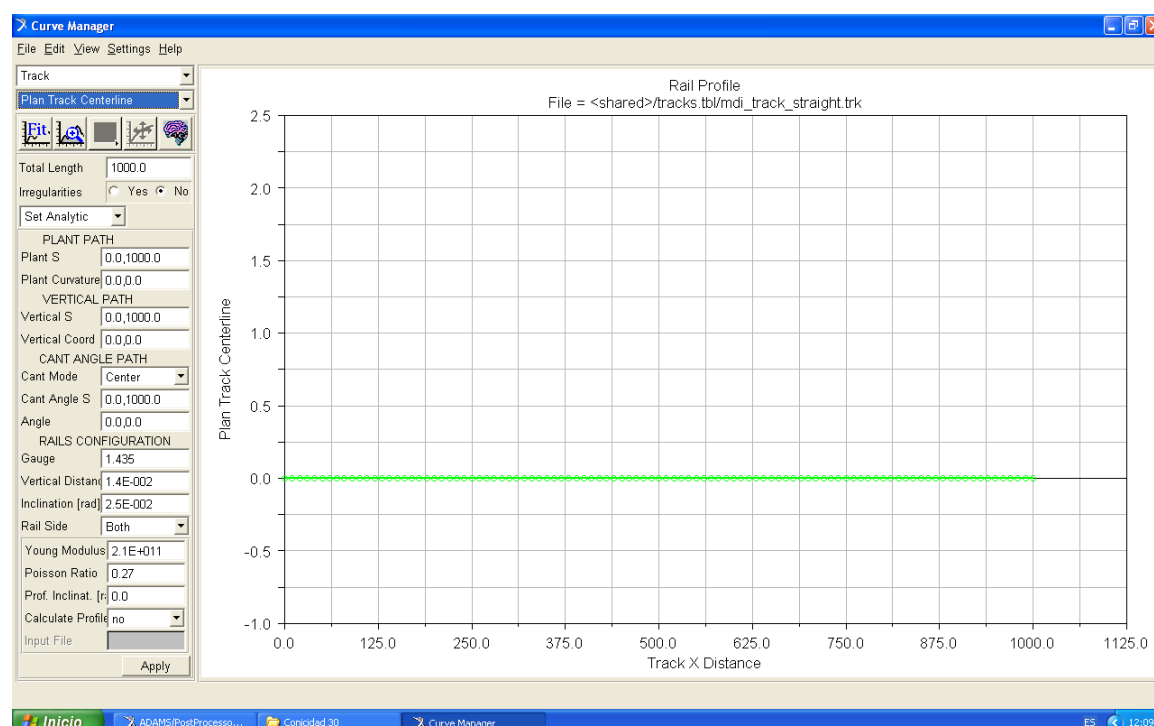
A continuación se representan en sucesivas tablas las gráficas para cada hipótesis de simulación considerada en una vía de trazado recto para que se aprecie, de una forma clara, cómo varía la simulación si se modifican la velocidad de 20 m/s a 30 m/s o cómo varía si se introduce un cambio en la conicidad de las ruedas.

En la *figura 62* se representa el trazado de una vía recta en Adams Rail, sin ser la longitud completa ya que sino no se apreciaría bien en la imagen.



*Figura 62: Trazado de la vía recta*

Empleando la herramienta *Curve Manager*, podemos obtener las características de nuestro tramo de vía como se puede apreciar en la siguiente figura, el perfil utilizado para estas simulaciones, es un perfil UIC



*Figura 63: Propiedades tramo recto de vía*

Como hemos comentado, vamos a realizar el análisis en el centro de la rueda izquierda, del eje frontal, del bogie delantero. En todas las gráficas se ha tomado como eje de abscisas la longitud de la vía, en concreto el raíl izquierdo.

Hay que tener en cuenta que la rueda objeto de estudio pertenece a un vagón, por lo que le influye lo que suceda en el resto de las ruedas que equipa el vehículo, así como sistema de suspensión.

## **PARÁMETROS DE CONTROL**

### **I. ACELERACIÓN**

Las gráficas de aceleración se representan en las *tablas 15 a 20*, se ha realizado un zoom para estudiar las gráficas, ya que, se estabiliza en un período de tiempo muy corto en comparación con el total y por tanto, sino sólo se podría apreciar una recta. El eje de ordenadas representa la aceleración del vehículo en  $\text{m/s}^2$ . Se ha considerado que el vehículo inicia la simulación a la velocidad deseada en cada caso.

#### **❖ Conicidad 1/10**

En estas gráficas se aprecia una variación brusca de la aceleración al inicio de la simulación, en un corto espacio de tiempo, que introduce el programa por defecto. Esta aceleración es de escasa magnitud, en torno a  $0,6075 \text{ m/s}^2$  para velocidad 20 m/s y para velocidad de 30 m/s, a medida que avanzamos en el tiempo se aprecia como a 20 m/s se estabiliza antes el vehículo pero con una diferencia respecto a 30 m/s de  $0,0125 \text{ m/s}$  por lo que podemos considerar despreciable. Estos picos ascendentes y descendentes bruscos que se aprecian en muchas gráficas son debidos posiblemente a los efectos de las suspensiones, amortiguadores etc. La estabilidad la alcanzamos a los 0,18 segundos de iniciar la simulación.

#### **❖ Conicidad 1/20**

En estas gráficas se aprecia, al igual que en el caso anterior, una variación brusca de la aceleración al inicio de la simulación, en un corto espacio de tiempo, que introduce el programa por defecto. Esta aceleración es de escasa magnitud, en torno a  $0,6063 \text{ m/s}^2$  para velocidad 20 m/s y para velocidad de 30 m/s, a medida que avanzamos en el tiempo se aprecia como a 20 m/s se estabiliza antes el vehículo pero con una diferencia respecto a 30 m/s de  $0,05 \text{ m/s}^2$  hasta que poco a poco se estabilizan, por lo que podemos considerar despreciable pero se aprecia un aumento respecto al caso de conicidad 1/10. Y como hemos comentado anteriormente estos picos ascendentes y descendentes bruscos que se aprecian en muchas gráficas son debidos posiblemente a los efectos de las suspensiones, amortiguadores etc. En este caso se alcanza la estabilidad aproximadamente a 0,275 segundos, después que el caso anterior.

### ❖ Conicidad 1/30

En este caso se aprecia un pico inicial de  $0.5396 \text{ m/s}^2$  en ambos caso, como se puede apreciar a medida que disminuimos la pendiente del perfil de nuestra rueda, el pico inicial de aceleración se hace mayor. Sin embargo se puede apreciar, que la amplitud existente en ambas curvas es la misma y convergen al mismo tiempo, es decir no afecta el cambio de velocidad en este caso. La estabilidad se alcanza a los 0,15 segundos del inicio.

### ❖ Conicidad 1/40

En el caso de conicidad 1/40, se sigue observando que el pico inicial aumenta conforme la inclinación del perfil es menor, en este caso el pico inicial de las curvas asciende hasta una aceleración de  $0,54 \text{ m/s}^2$ , siendo igual para ambas velocidades. Como sucedía en el caso anterior, ambas velocidades tienen curvas de aceleración semejantes, por tanto con esta conicidad, tampoco se ve afectada la aceleración al variar la velocidad de 20 m/s a 30 m/s. La estabilidad se alcanza 0,14 segundos, que como observamos sigue la tendencia anterior, a menor inclinación, la estabilidad se alcanza antes.

### ❖ Conicidad 1/50

Con esta conicidad se obtiene un pico inicial en ambas velocidades de  $0,54 \text{ m/s}^2$  que se va estabilizando finalizando la convergencia a 0,1430 segundos para ambas velocidades, se observa que ha aumentado 3 milésimas de segundo con respecto la conicidad 1/40, lo cual consideramos despreciable. Al igual que en los caso anteriores a partir de la conicidad 1/30 inclusive, el cambio de velocidad afecta a la aceleración longitudinal.

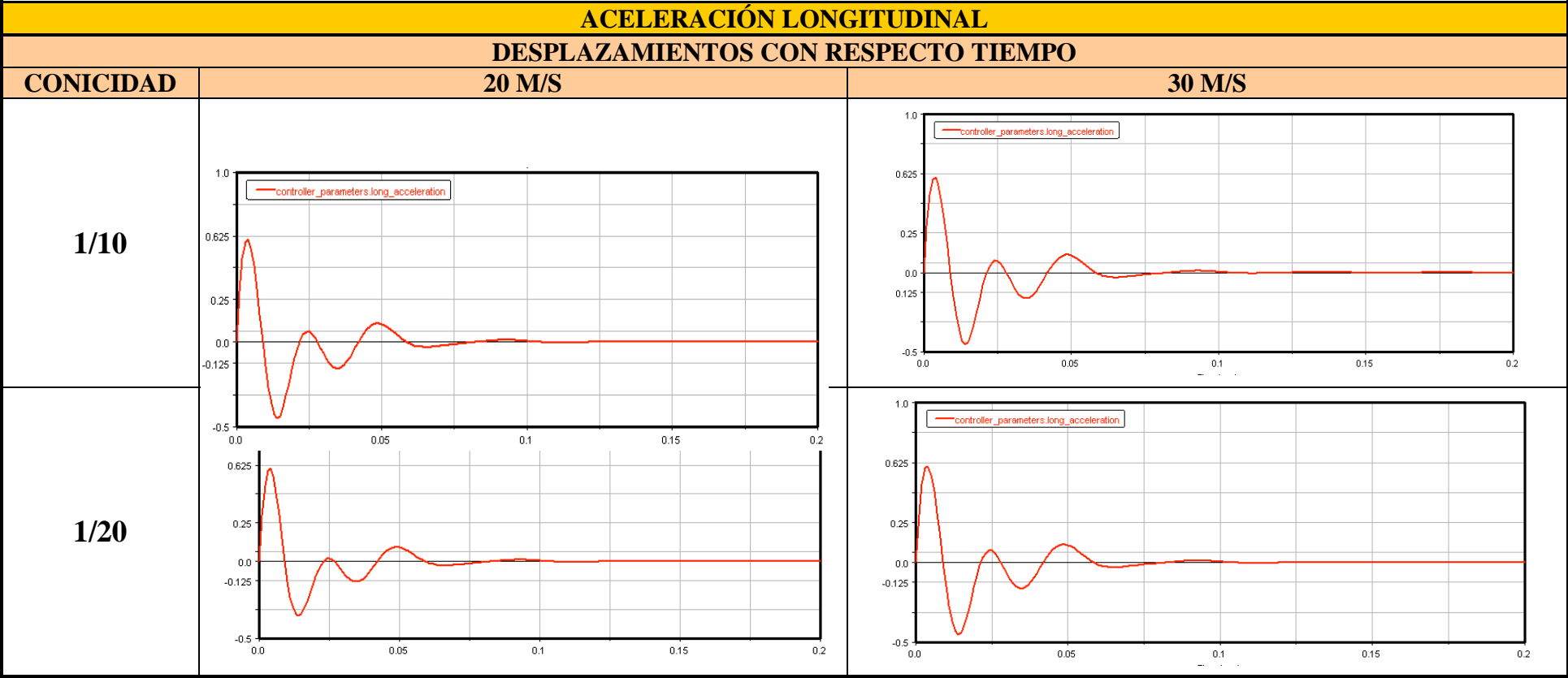
### ❖ Conicidad rueda plana.

Por último tenemos la rueda plana, sabemos que en la actualidad no se diseñan las ruedas de vehículos ferroviarios planas, pero queríamos comprobar que resultados nos muestra el software. El pico inicial debido posiblemente a los sistemas de suspensión, amortiguación, etc, se establece en  $0,6073 \text{ m/s}^2$ . Se comprueba que al igual que en los caso de conicidades 1/30, 1/40, 1/50, el cambio que hemos introducido al variar la velocidad de 20 m/s a 30 m/s, no afecta al comportamiento dinámico de nuestro vehículo, alcanzando la estabilidad a 0,18 segundos aproximadamente del inicio del trayecto.

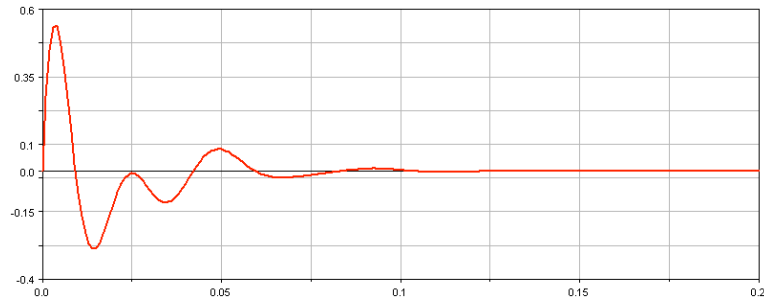
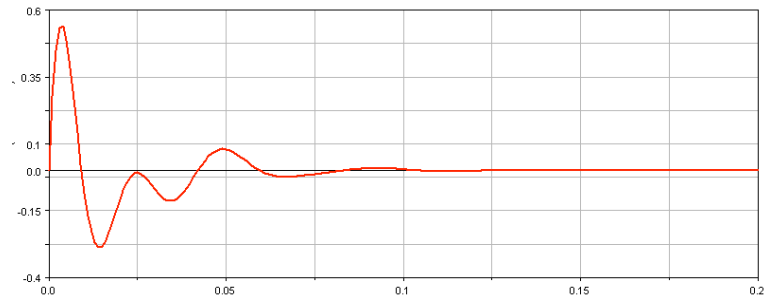
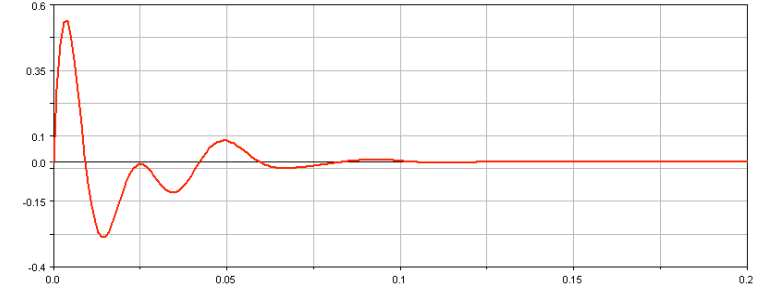
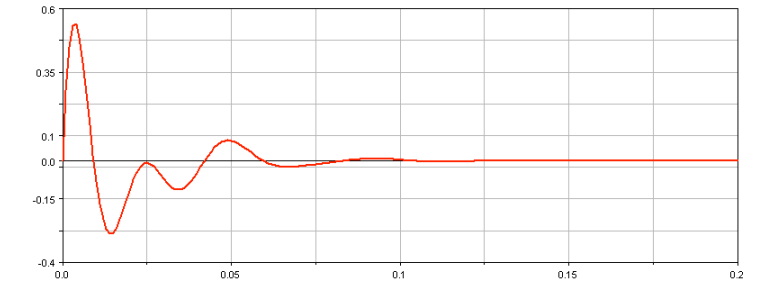
## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Gracias a éstas simulaciones vemos como a partir del perfil 1/30, el cambio de velocidad no afecta a la aceleración longitudinal y como la estabilidad se alcanza en un período de tiempo más corto. Sin embargo a partir de la conicidad 1/50, este período de tiempo va aumentando desde los 0,14 segundos hasta alcanzar el valor de 0,18 segundos con una rueda de conicidad plana.

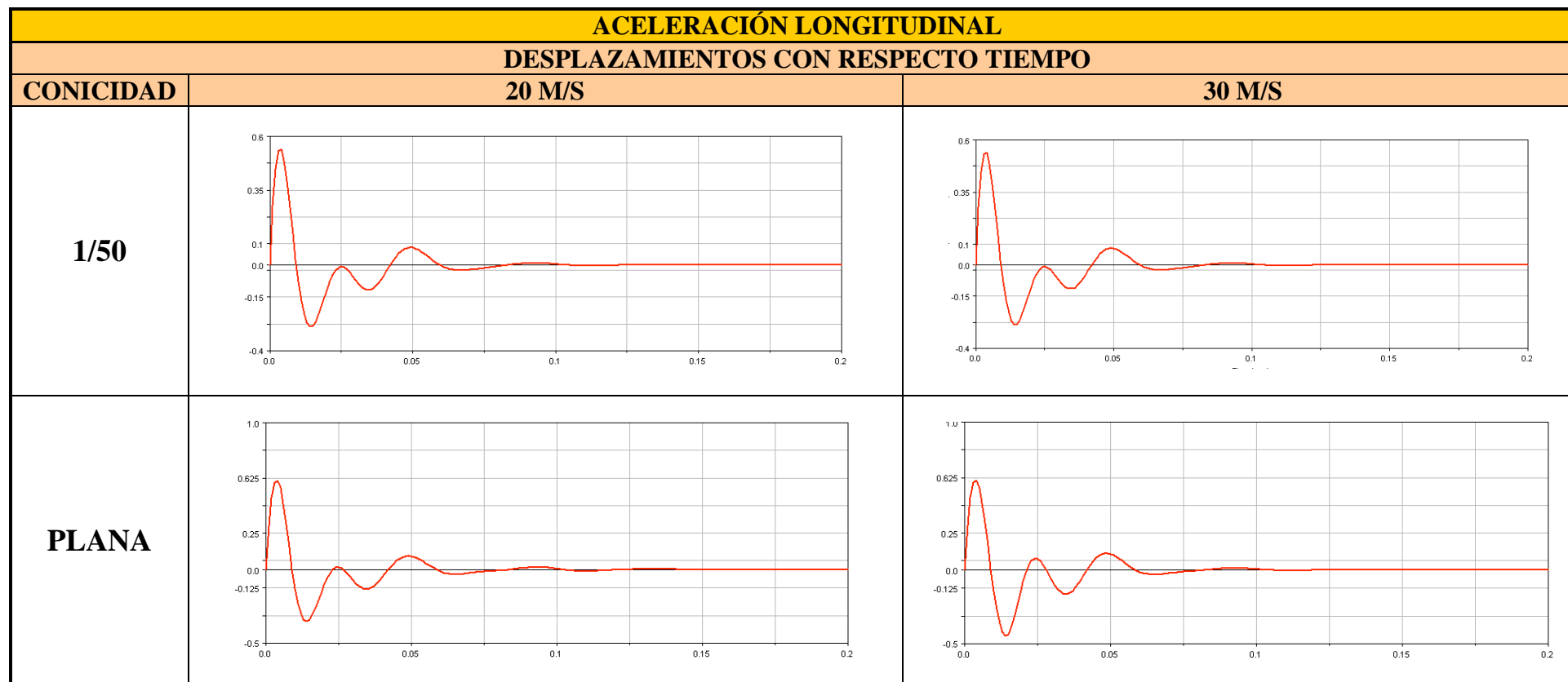
Tabla 16: Aceleración longitudinal en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20..



**Tabla 17: Aceleración longitudinal en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.**

ACELERACIÓN LONGITUDINAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO TIEMPO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/30		
1/40		

*Tabla 18: Aceleración longitudinal en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.*



## II. VELOCIDAD

Las gráficas de la representación de la velocidad durante el trayecto de tramo recto del vehículo ferroviario Avant serie S-104, se representan en la *tabla* .

### ❖ Conicidad 1/10

Al igual que sucedía en los resultados de la aceleración, en las gráficas de la velocidad se puede observar que al inicio se produce un pico máximo de 0,0035 m/s respecto de la velocidad de 20 m/s ó de 30 m/s, en ambas gráficas, lo que se considera despreciable y su estabilidad se alcanza a los 0,18 segundos a 20 m/s y en 0,11 a 30 m/s. Se observa que con una conicidad de 1/10 es más favorable a 30 m/s que a 20 m/s.

### ❖ Conicidad 1/20

Con ésta conicidad se aprecia como en el caso anterior un pico inicial de 0,0035 en ambas velocidades por lo que se puede considerar despreciable y como se estabiliza a 0,105 segundos en el caso de velocidad 20 m/s, hasta llegar a dicha velocidad, y a 0,11 segundos en el caso de 30 m/s, se puede considerar que la velocidad es constante.

Se aprecia también que el tiempo de estabilización en este caso, aumenta conforme se aumenta la velocidad.

### ❖ Conicidad 1/30

Para la conicidad de 1/30 a se produce en ambas velocidades un pico de 0,003 m/s que se puede considerar despreciable. Se estabiliza en un tiempo de 0,09 segundos para la velocidad de 20 m/s y de 30 m/s, por lo que se pueden considerar en ambas velocidades constantes a lo largo del recorrido.

### ❖ Conicidad 1/40

Al igual que en el caso anterior, para ambas velocidades se produce un pico al inicio del trayecto de 0,003 m/s durante 0,09 segundo por lo que se puede considerar despreciable y que en ambos casos circula a velocidad constante de 20 m/s ó 30 m/s.

### ❖ Conicidad 1/50

Ambas velocidades se produce un pico de 0,003 m/s por encima y por debajo de la velocidad establecida, que dura 0,09 segundos igual que en las conicidades anteriores y posteriormente se estabiliza a la velocidad constante seleccionada en el análisis.



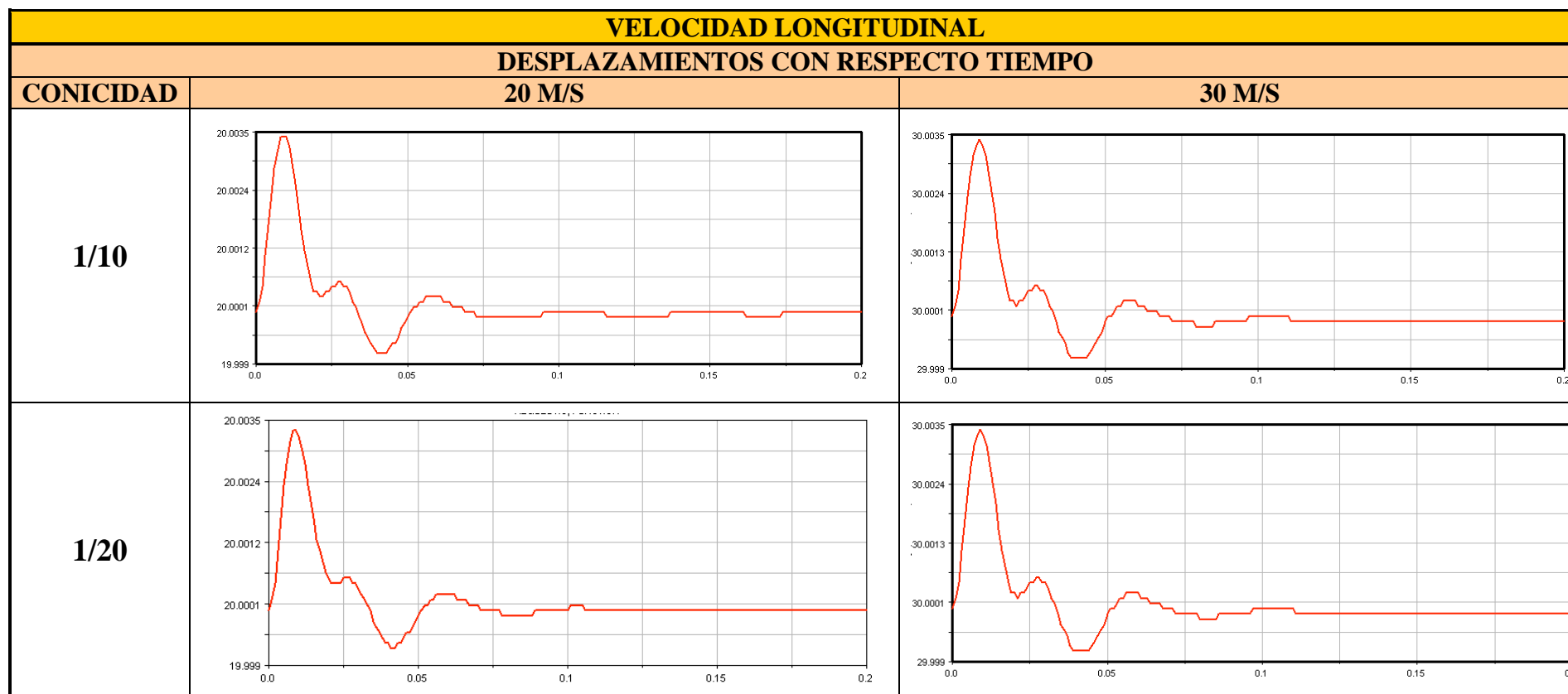
### ❖ Conicidad rueda plana.

En ésta conicidad se observa las mismas características que en las conicidades anteriores, picos en ambas velocidades de 0,003 m/s superior e inferior a la velocidad establecida en el análisis, y posteriormente se estabiliza a los 0,09 segundos del inicio por lo que podemos considerarlo despreciable y que la velocidad es constante a lo largo del recorrido.

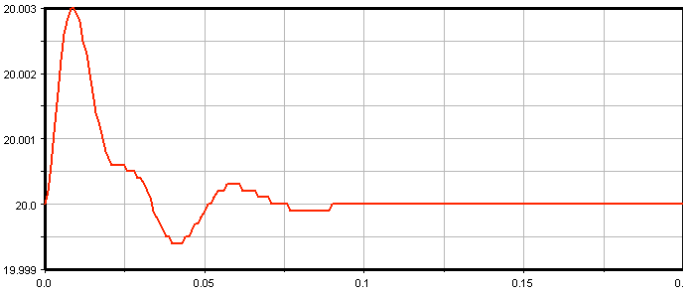
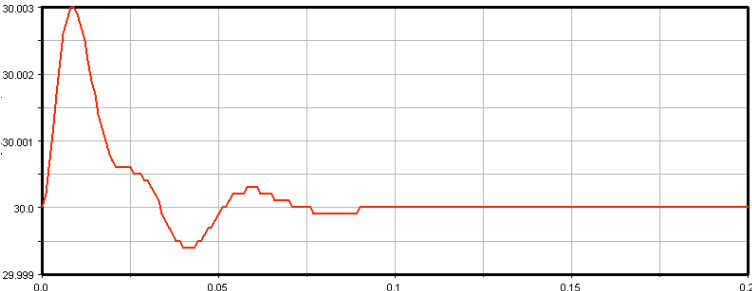
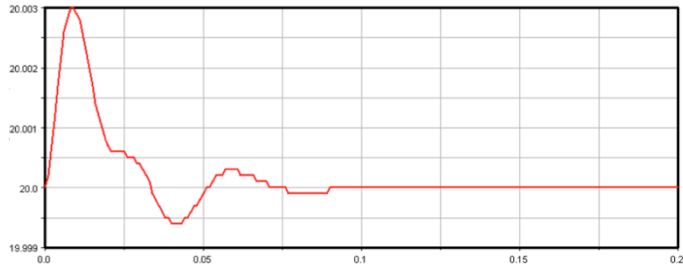
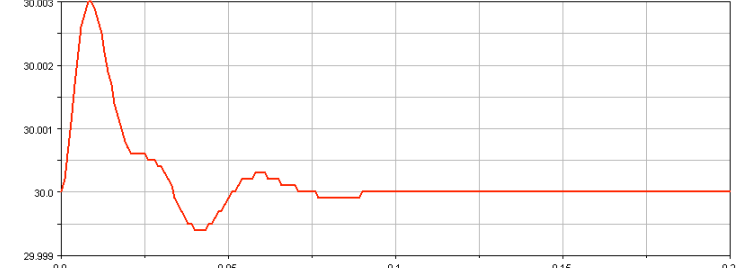
## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Las conclusiones que sacamos a la hora de comparar los análisis de las velocidades longitudinales para todas las conicidades y para ambas velocidades, es que al ser un tramo recto, la variación que se observa de la velocidad sólo se produce durante 0,09 segundos del inicio y con un valor de amplitud de 0,006 metros, por lo que podemos considerarlo despreciable y que es constante a lo largo del recorrido, y como estos valores son similares en todas las conicidades se puede establecer que para estas velocidades, es indiferente la conicidad que se utilice, para tramo recto siempre será constante y estable durante todo el recorrido, aunque si somos estrictos son más favorables las conicidades a partir de 1/30 donde la estabilización se produce antes que en las otras conicidades.

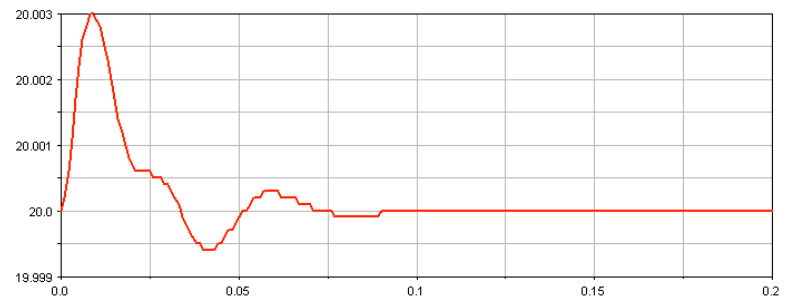
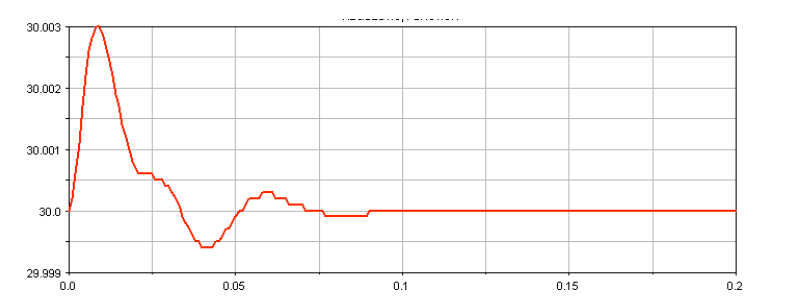
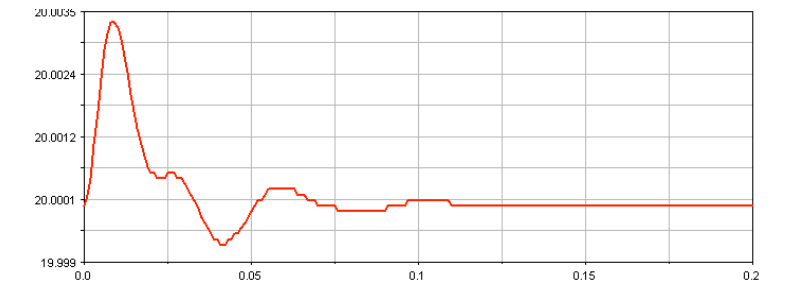
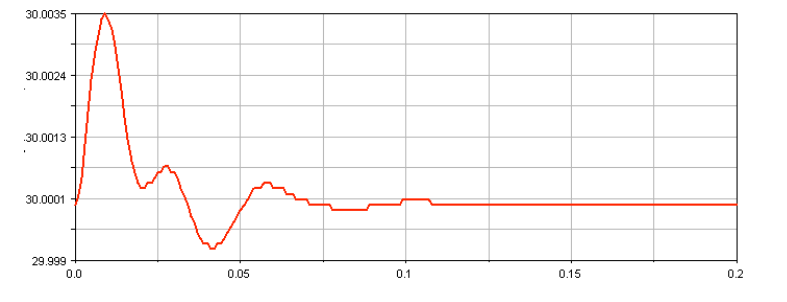
*Tabla 19: Velocidades longitudinales en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.*



*Tabla 20: Velocidades longitudinales en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.*

VELOCIDAD LONGITUDINAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO TIEMPO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/30		
1/40		

*Tabla 21: Velocidades longitudinales en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.*

VELOCIDAD LONGITUDINAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO TIEMPO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/50		
PLANA		

## **DESPLAZAMIENTOS**

### **I. DESPLAZAMIENTO LATERAL**

Las gráficas de desplazamiento lateral se representan en las *tablas*. El eje de ordenadas representa el desplazamiento lateral Y en metros de la rueda izquierda del eje frontal del bogie delantero.

#### **❖ Conicidad 1/10**

En la gráfica de simulación a 20 m/s se aprecia que el desplazamiento lateral oscila ligeramente hasta estabilizarse en -0,003 m aproximadamente a unos 75 metros del origen. Para una velocidad de 30 m/s los valores son similares salvo la estabilización que se alcanza a unos 150 metros del origen. Este valor puede deberse a un reparto de cargas no simétrico en el análisis de precarga realizado. La estabilización empeora según se aumenta la velocidad.

#### **❖ Conicidad 1/20**

En este caso a una velocidad de 20 m/s se aprecia que el desplazamiento oscila entre -0,003 m pero con una frecuencia mucho mayor (aproximadamente 0,73 Hz) que a 30 m/s que es de 1,74 Hz, dónde la oscilación también es alrededor de los -0,003 m. En este caso al aumentar la velocidad se obtiene una mejora tanto en el tiempo de estabilización, que en el caso de 20 m/s sucede a 600 metros y a 30 m/s a 140 metros del origen, como en la frecuencia de oscilación del vehículo.

#### **❖ Conicidad 1/30**

Con esta conicidad se observa, para una velocidad de 20 m/s, un desplazamiento inicial que oscila entre -0,0032 y -0,0046 m y se estabiliza a 548 metros del origen. Mientras que para 30 m/s, la oscilación inicial es la misma pero la estabilidad se alcanza antes, a 509 metros del origen. Se observa que según disminuimos la pendiente del perfil de la rueda, los desplazamientos laterales se vuelven más inestables.

#### **❖ Conicidad 1/40**

Observamos que para ambas velocidades la oscilación inicial es similar y semejante a las demás conicidades, el rededor de -0,003 metros y -0,0045 metros, pero el período de estabilización aumenta; para la velocidad de 20 m/s se consigue a una distancia de 764 metros, mientras que para 30 m/s aproximadamente a 864 metros. Como vemos al aumentar la conicidad la inestabilidad aumenta aunque las amplitudes con las que estamos trabajando son del orden de las milésimas y se pueden considerar despreciables.

#### **❖ Conicidad 1/50**

En ambas velocidades se produce una oscilación entre -0,0032 metros y -0,0046 metros y no se estabiliza hasta alcanzar los 791 metros a 20 m/s, y los 847 metros a 30

m/s. Aunque . Se observa la tendencia vista anteriormente y según la pendiente es menor el período de estabilización se hace mayor.

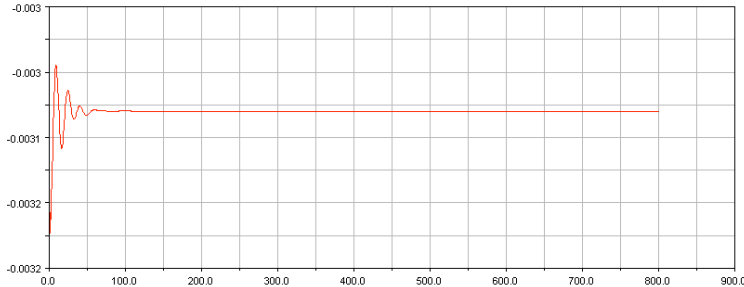
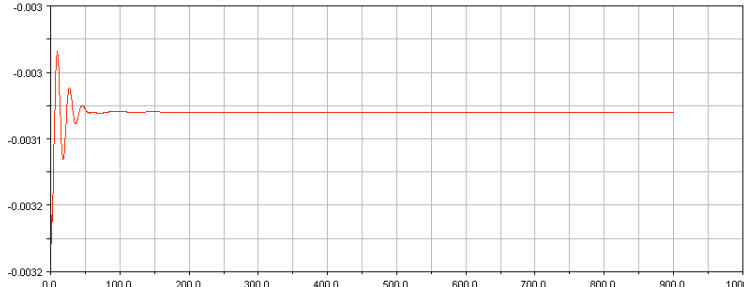
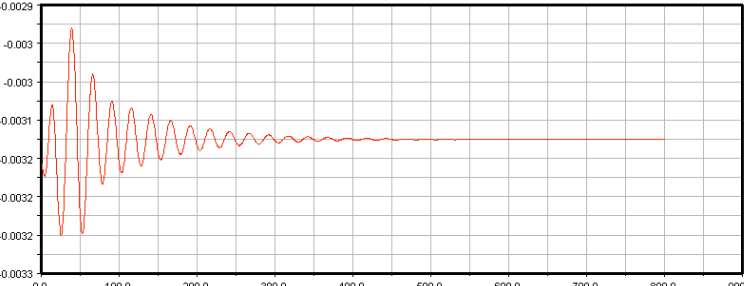
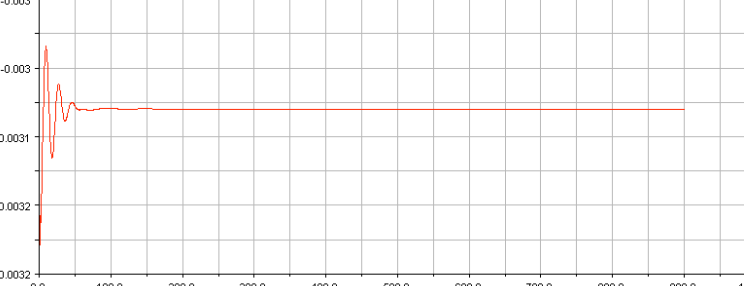
#### ❖ **Conicidad rueda plana.**

Sin embargo, esta conicidad, rompe con la tendencia que se estaba produciendo, ya que la amplitud de oscilación es del orden de 0,0001 metros ya que oscila entre -0,0032 metros y -0,0031 metros. Además la estabilización se alcanza a 189 metros para la velocidad de 20 m/s y a 201 metros a 30 m/s. El desplazamiento lateral es más favorable a velocidad de 20 m/s que a 30 m/s.

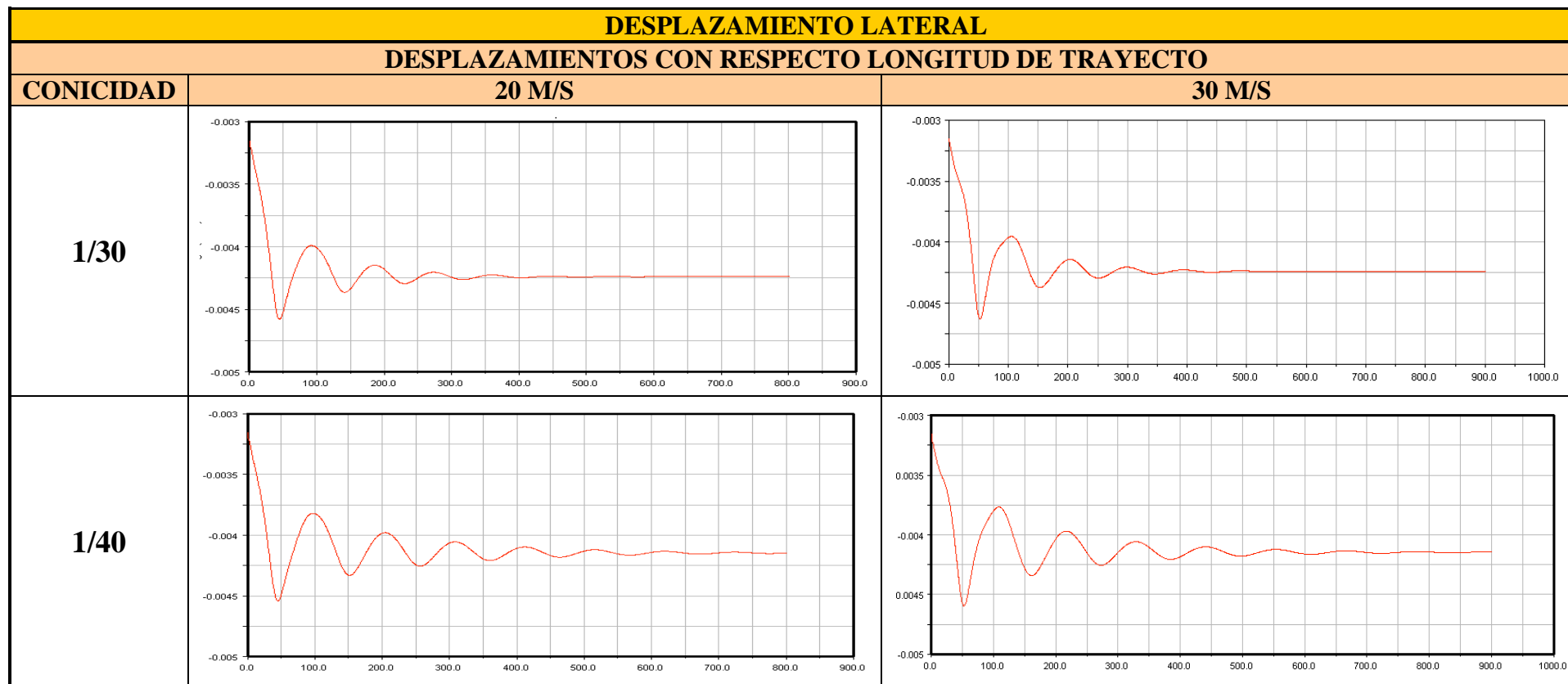
### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Una vez analizadas todas las simulaciones podemos concluir que a la velocidad más óptima sería a 20 m/s ya que en todas las conicidades, a excepción de 1/20, se alcanza antes la estabilización siendo los demás parámetros prácticamente similares y que a medida que vamos disminuyendo la conicidad del perfil se obtienen resultados más desfavorables. Sin embargo al disminuir al máximo la pendiente, la rueda se hace plana por lo que el movimiento de lazo es prácticamente nulo y por consiguiente el desplazamiento lateral se estabiliza antes, que es lo que se ha obtenido con estas simulaciones.

Tabla 22: Desplazamientos laterales en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.

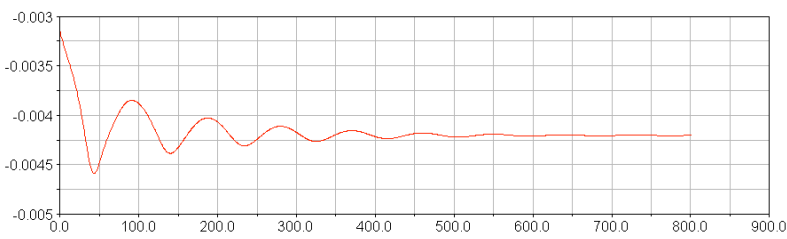
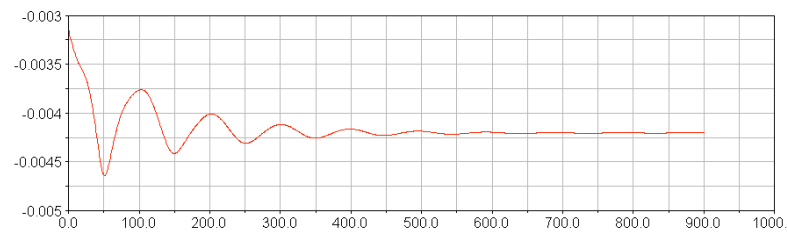
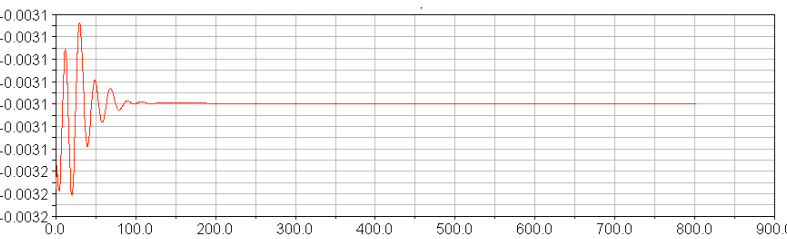
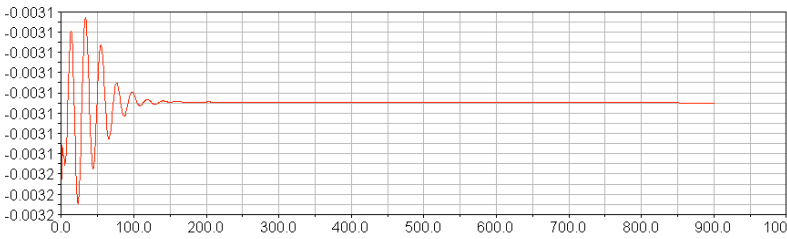
DESPLAZAMIENTO LATERAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 23: Desplazamientos laterales en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.*





*Tabla 24: Desplazamientos laterales en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.*

DESPLAZAMIENTO LATERAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/50		
PLANA		

## II. DESPLAZAMIENTO VERTICAL

Las gráficas de desplazamiento vertical se representan en las *tablas*. El eje de ordenadas representa el desplazamiento vertical  $Z$ , en metros, de la rueda derecha del eje frontal del bogie delantero. Hay que tener en cuenta que se mantiene en torno a 0,473 m que es el radio de la rueda para todas las conicidades, ya que se toma como origen de coordenadas el punto de contacto de la rueda con el raíl.

### ❖ Conicidad 1/10

Se puede apreciar como hemos comentado anteriormente, que el desplazamiento vertical se mantiene 0,473 m. La diferencia que se aprecia a 20 m/s y a 30 m/s es la longitud recorrida por la rueda antes de llegar a estabilizarse. En el caso de 20 m/s recorre una distancia de 26,25 metros, mientras que a 30 m/s recorre 30 metros, es decir si aumentamos nuestra velocidad la estabilidad se produce más tarde.

### ❖ Conicidad 1/20

En el caso de una conicidad de 1/20, se obtiene que el período de estabilización a 20 m/s se consigue cuando el vehículo ferroviario a recorrido 137,5 metros mientras que a 30 m/s recorre 31,5 m antes de que la solución converja. Como se puede apreciar la conicidad 1/20 mejora según la velocidad aumenta, pero en condiciones similares es más óptima la conicidad 1/10, debido a que el período de estabilización es menor.

### ❖ Conicidad 1/30

Como sucedía en las conicidades anteriores, el vehículo en ambas velocidades, oscila entre valores de 0,473 metros y 0,429 metros debido a que es el radio de la rueda. Sin embargo podemos apreciar que si aumentamos la velocidad a 30 m/s respecto de 20 m/s, se produce un aumento en la distancia recorrida antes de la estabilización. Para 20 m/s se alcanza a 378 metros y para 30 m/s se obtiene a 419 metros. La tendencia que sigue estos resultados nos demuestra que atendiendo a los desplazamientos, si la conicidad es menor el vehículo se vuelve más inestable, pero como hemos indicado anteriormente, esta inestabilidad tiene una amplitud de 0,004 metros la cual podemos considerar despreciable.

### ❖ Conicidad 1/40

Si analizamos esta conicidad los resultados son similares a las anteriores, en ambas velocidades se produce una oscilación inicial entre 0,473 metros y 0,429 metros, y la distancia de estabilización aumenta con respecto a la conicidad anterior. Para 20 m/s se alcanza a 789m y para 30 m/s a 848 metros.

### ❖ Conicidad 1/50

Al igual que en las conicidades anteriores, para ambas velocidades, se produce una oscilación entre valores de 0,473 metros y 0,429 metros debido al radio de la rueda, alcanzándose la estabilización en 554 metros para 20 m/s y en 508 metros para 30 m/s. En este caso el aumento de la velocidad mejora el período de estabilización haciéndolo más corto.

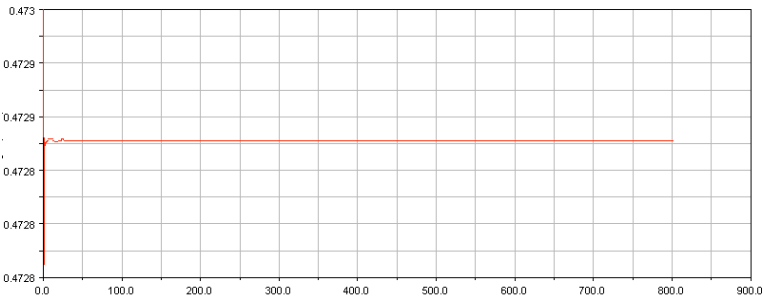
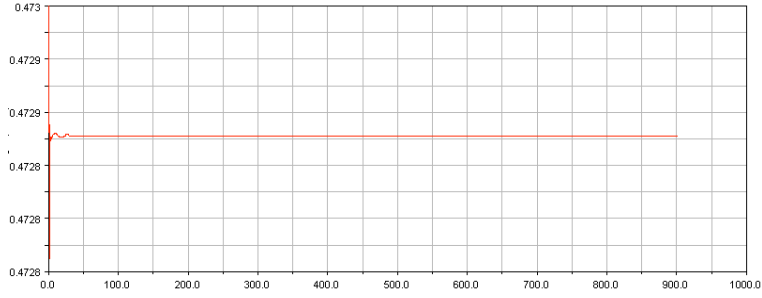
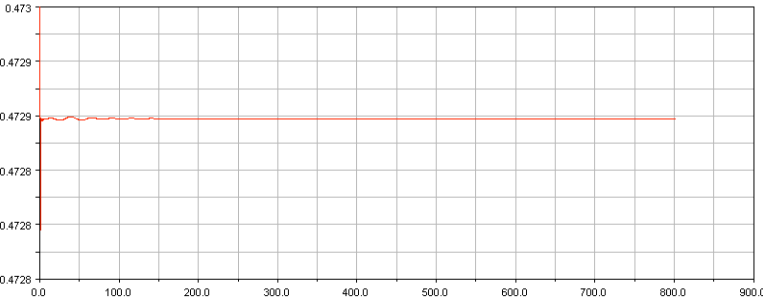
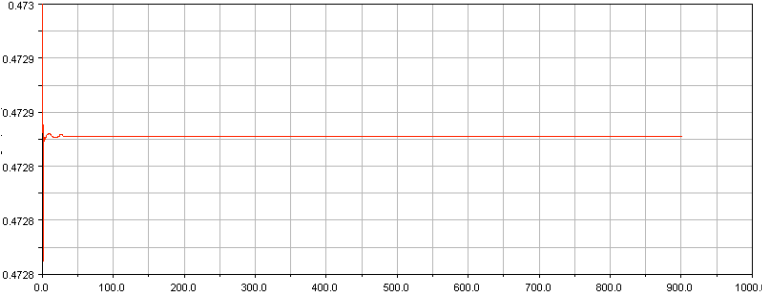
### ❖ Conicidad rueda plana.

Para el caso de conicidad plana como ha sucedido en el desplazamiento lateral, se obtienen valores mucho más favorables que en las demás conicidades. En este caso en ambas velocidades oscilará entre 0,473 metros y 0,428 metros y se estabilizará a 8,18 metros del origen a 20 m/s y a 30 m/s se producirá a 6,35 metros. Más favorable a velocidad 30 m/s que a 20 m/s.

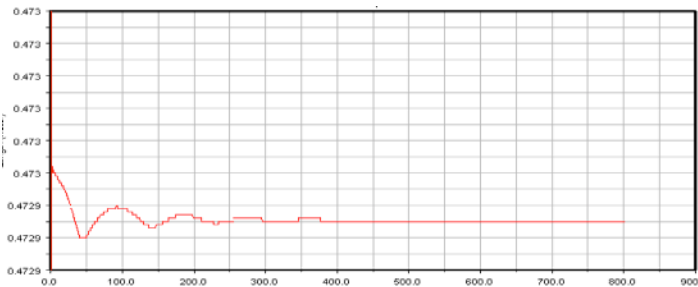
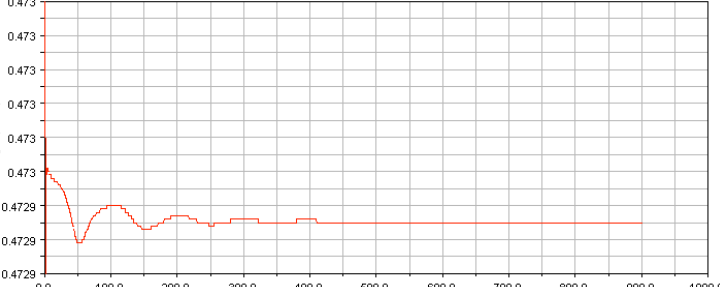
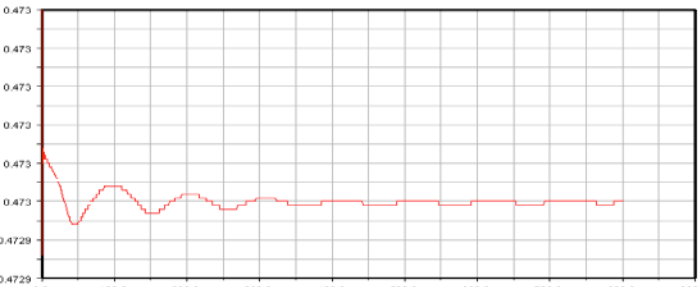
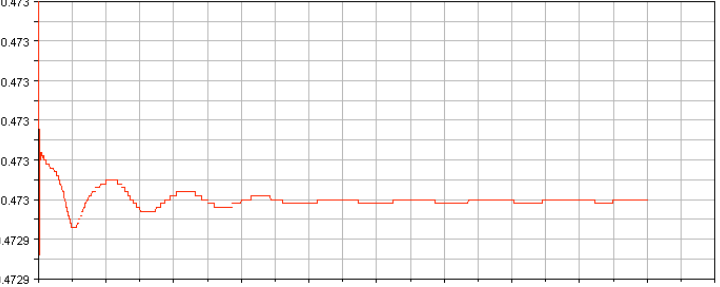
## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al igual que en el caso anterior, se observa unos valores mucho más favorables con conicidad plana que con el resto, debido a lo explicado en el caso del desplazamiento lateral. Se observa que para conicidades inferiores a 1/50 se obtiene mejores resultados con velocidades bajas. Y para conicidades iguales o superiores a 1/50 se obtienen mejores resultados para velocidades altas.

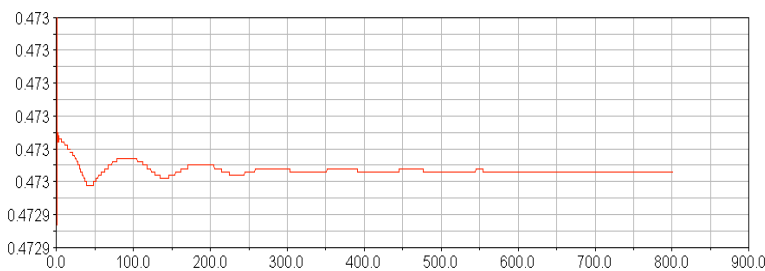
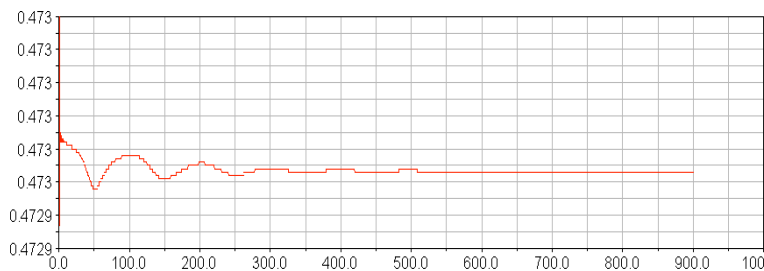
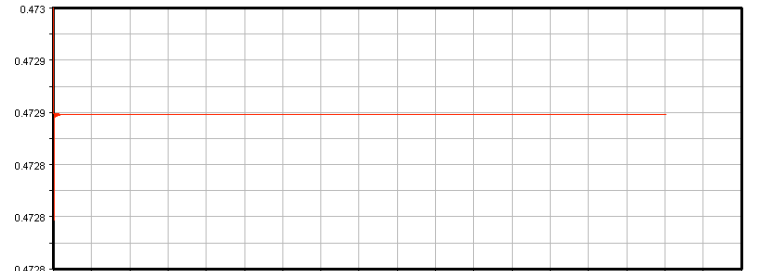

Tabla 25: Desplazamientos verticales en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.

DESPLAZAMIENTO VERTICAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 26: Desplazamientos verticales en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.*

DESPLAZAMIENTO VERTICAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/30		
1/40		

*Tabla 27: Desplazamientos verticales en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.*

DESPLAZAMIENTO VERTICAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/50		
PLANA		

## **FUERZAS**

### **I. FUERZA FX**

Las gráficas de la representación de la fuerza en dirección X durante el trayecto de tramo recto del vehículo ferroviario Avant serie S-104, se representan en las *tablas*. El eje de ordenadas representa la fuerza en dirección X que es la dirección que sigue el tren.

#### **❖ Conicidad 1/10**

Se produce un pico inicial de 10.000 N, que se estabiliza prácticamente a cero a los 20 metros del inicio del trayecto, mientras que a 30 m/s el pico inicial es de 7500 N pero la estabilización se produce a unos 47 metros del inicio.

#### **❖ Conicidad 1/20**

Se produce también un pico inferior a 10.000 N similar en ambas velocidades pero al aumentar la velocidad, el período de estabilización mejora al aumentar la velocidad y los resultados son menos favorables que respecto a la conicidad 1/10 ya que alcanza la estabilidad antes y con valores de fuerza menores, aunque está diferencia es pequeña.

#### **❖ Conicidad 1/30**

A 20 m/s se produce inicialmente un máximo de 6.804 N y un mínimo de 2.859 N y la estabilización a 244 metros del origen con un valor de -92,575 N. Para la velocidad de 30 m/s, el pico máximo disminuye hasta alcanzar un valor de 6.084 N y un mínimo muy similar pero inferior de -2.783 N, sin embargo la estabilización se adquiere a 268 metros y también con un valor de -92,575 N.

#### **❖ Conicidad 1/40**

Aquí podemos observar como que se obtiene prácticamente los mismos valores de máximos y mínimos que en la conicidad de 1/30 tanto para 20 m/s como para 30 m/s. Sin embargo se produce la estabilización más tarde que en la conicidad anterior. Para 20 m/s a 534 metros y valor -92,575 N y a 30 m/s a 571 metros y también de valor -92,575 N. Se observa que la tendencia que sigue es la siguiente, al disminuir la conicidad y por tanto la pendiente de nuestro perfil de rueda la estabilización se alcanza más tarde.

#### **❖ Conicidad 1/50**

Observamos que al aumentar la velocidad se obtiene un pico máximo menor que a 20 m/s, siendo este de valor 6.902 N mientras que para 30 m/s es de 6.184 N. La estabilización se alcanza a 342 metros del origen para 20 m/s, y a 365 metros para 30 m/s. Estabilizándose en -139 N para ambas velocidades.

**❖ Conicidad rueda plana.**

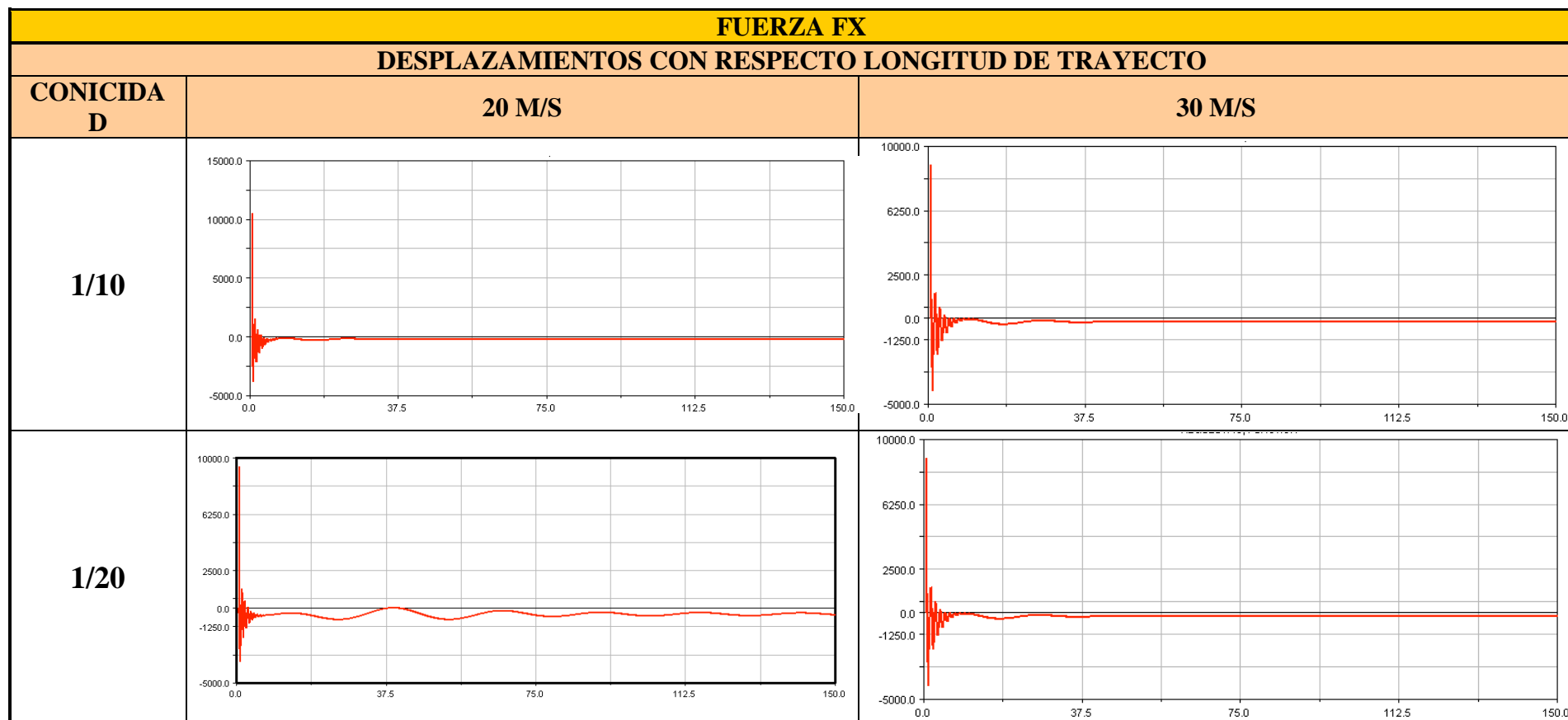
Se produce oscilación entre 9.517 N y -3338 N para la velocidad de 20 m/s y de 7969 N y -4617 N para la velocidad de 30 m/s. Se observa que el período de oscilación antes de la estabilización es mayor a 20 m/s que a 30 m/s. Ambas se estabilizan en un valor de -280 N, sin embargo a 20 m/s se produce la estabilización a 61 metros del origen mientras que para 30 m/s a 78 metros.

**ANÁLISIS DE RESULTADOS**

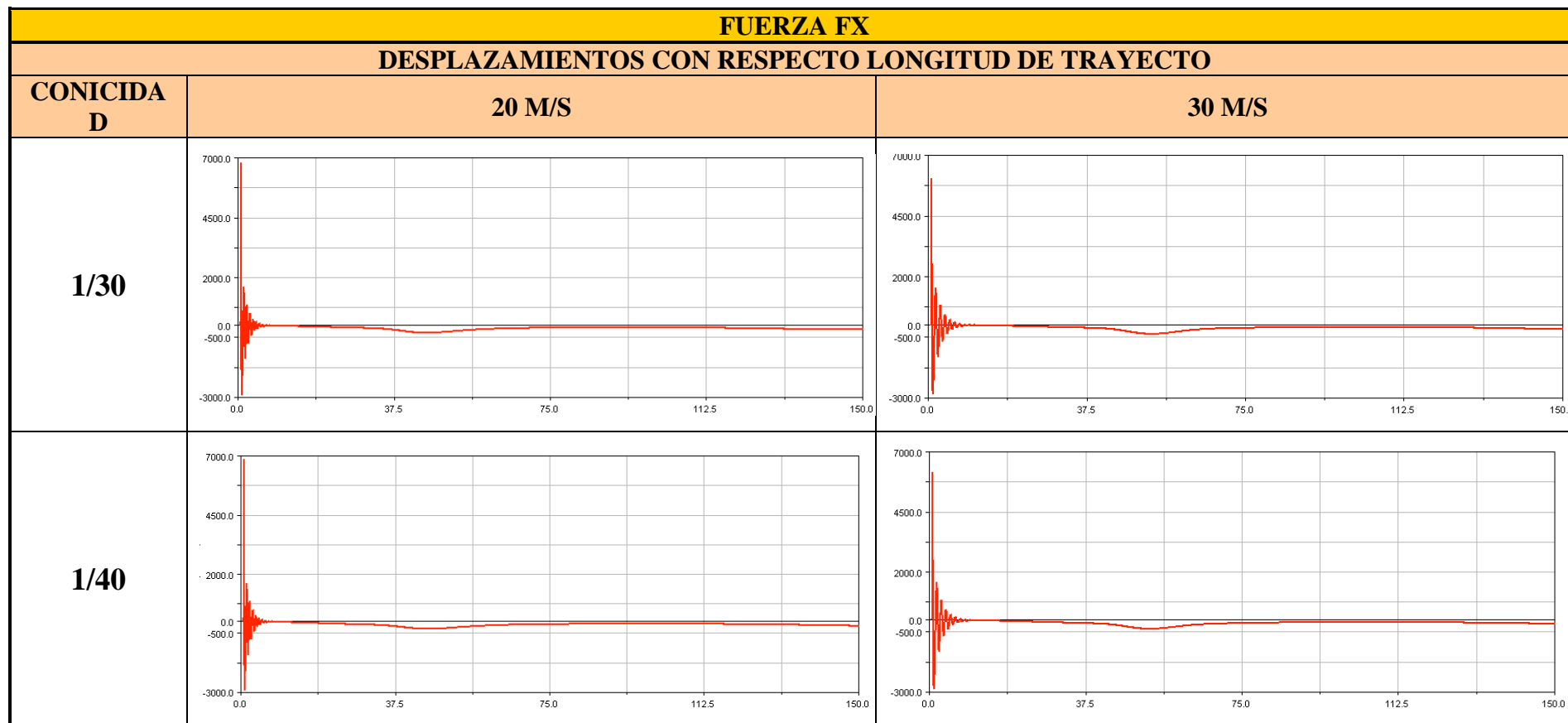
Al igual que sucedía en los caso anteriores, la rueda de conicidad plana nos proporciona un período de estabilización más corto que los demás aunque con un valor de fuerza mucho mayor. Se observa que a medida que disminuimos el perfil, se aumenta el valor de estabilización y el tiempo necesario para que se dé. También se considera que es más favorable a 20 m/s que a 30 m/s lo que es lógico ya que si se aumenta la velocidad influenciará en el comportamiento dinámico del vehículo.



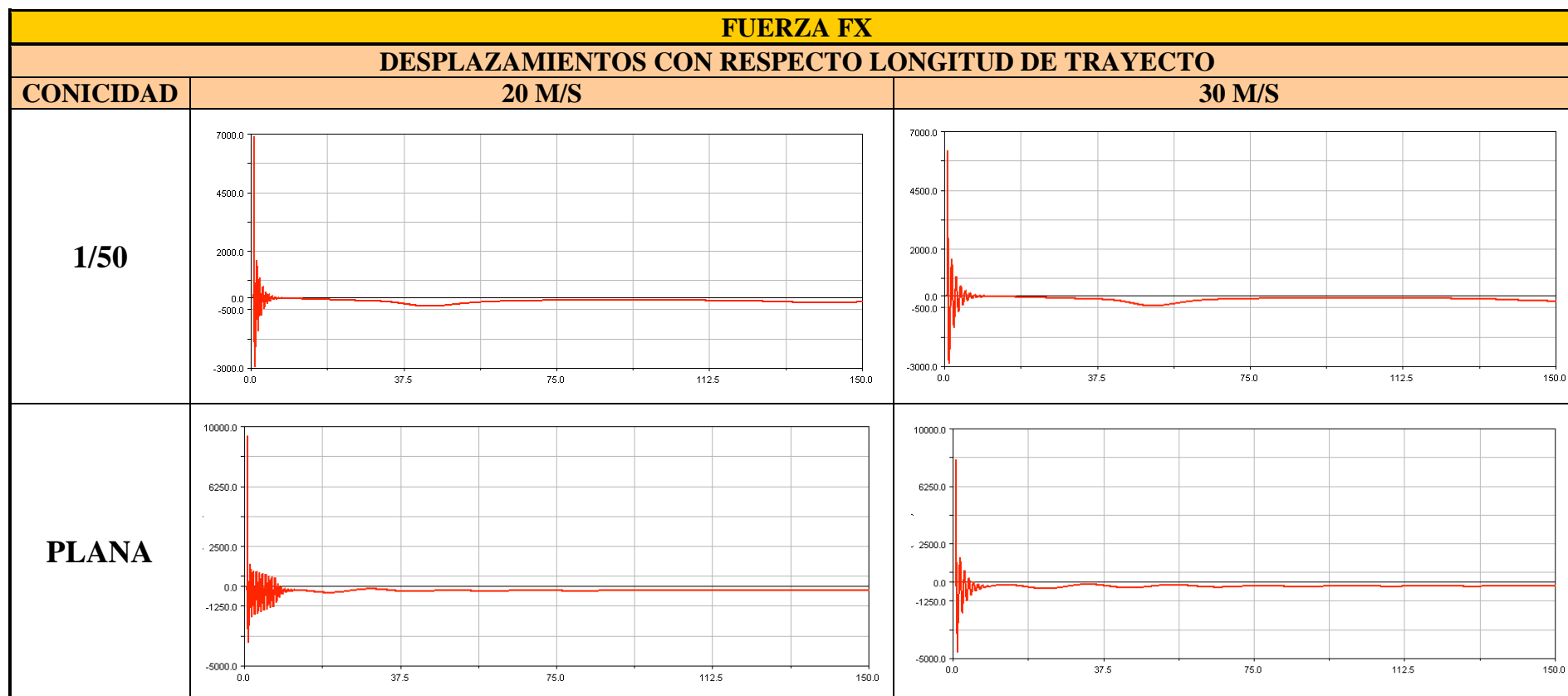
*Tabla 28: Fuerzas  $F_x$  en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.*



**Tabla 29: fuerzas  $F_x$  en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.**



**Tabla 30: Fuerzas  $F_x$  en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.**



## II. FUERZA FY

Las gráficas de la fuerza  $F_y$  se representan en las *tablas*. El eje de ordenadas representa la fuerza en dirección Y que es la dirección lateral.

### ❖ Conicidad 1/10

Con esta conicidad a 20 m/s, se obtiene que al principio de la simulación se produce un pico de 5500 N de la fuerza en dirección Y, estabilizándose a una distancia de 31 metros y cuyo valor es de 958 N mientras que a 30 m/s, se produce un descenso del pico inicial cuyo valor es de 4846 N y la estabilización se produce a 26 metros del origen y con un valor de 995 N. Como se observa al aumentar la velocidad el pico inicial disminuye al igual que el período de estabilización, pero la fuerza que soporta en dirección Y a lo largo del trayecto aumenta.

### ❖ Conicidad 1/20

Al aumentar la conicidad a 1/20, se consigue que el pico inicial sea menor que en la conicidad 1/10. A velocidad de 20 m/s, el pico se establece a 4135 N y no se estabiliza hasta pasados 262 metros y con un valor de 2130 N. A 30 m/s se produce un pico de 4786, es decir aumenta respecto de la velocidad 20 m/s, y se estabiliza a 38 metros del origen y con un valor de 995 N. Si aumentamos la velocidad se un comportamiento más estable de vehículo y se observa que este también es más favorable que con conicidad 1/10.

### ❖ Conicidad 1/30

En ambas velocidades se aprecia una oscilación inicial entre 450 N y -2.725 N, la estabilidad se alcanza antes a 20 m/s de valor 375 metros desde el origen y, mientras que para 30 m/s se alcanza a 405 metros, ambas se estabilizan a -390 N, se observa que el período de estabilización aumenta pero el valor al que se estabiliza es menor que las conicidades anteriores.

### ❖ Conicidad 1/40

En este caso ambas velocidades tienen semejantes picos máximos entre 758 N y -3158 N, llegándose a estabilizar a 20 m/s a una distancia de 427 metros y a la velocidad de 30 m/s se consigue la estabilización a 454 metros. Ambas se estabilizan en -332 N.

### ❖ Conicidad 1/50

Al inicio oscila entre 956 N y -3304 N para 20 m/s y entre 856 N y -3385 N para 30 m/s. Se estabilizan ambas a -194 N y a una distancia de 469 metros y de 414 metros respectivamente. Esto nos indica que es más favorable a 30 m/s que a 20 m/s, en este caso.

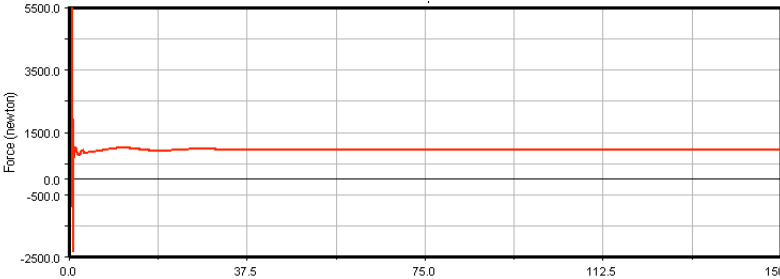
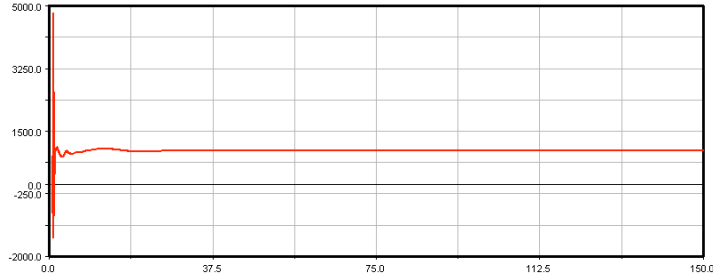
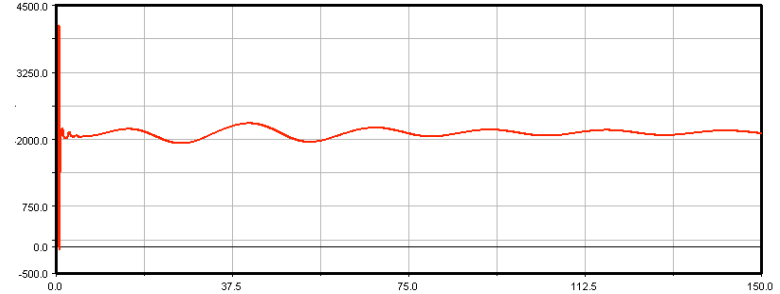
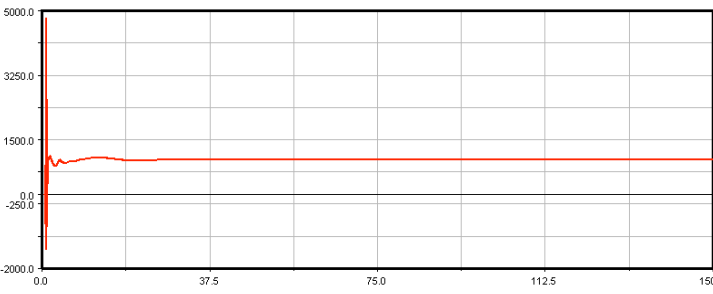
### ❖ **Conicidad rueda plana.**

Para la conicidad plana tenemos que para 30 m/s se obtiene una oscilación inicial de 885 N y -301 N y se estabiliza en 386 N a una distancia de 104 metros. Para la velocidad de 20 m/s tenemos que se estabiliza a 386 N también, y a una distancia de 74 metros desde el origen, y tiene su máximo y mínimo en 783 N y -572N. Se concluye que es más favorable cuando la velocidad es menor.

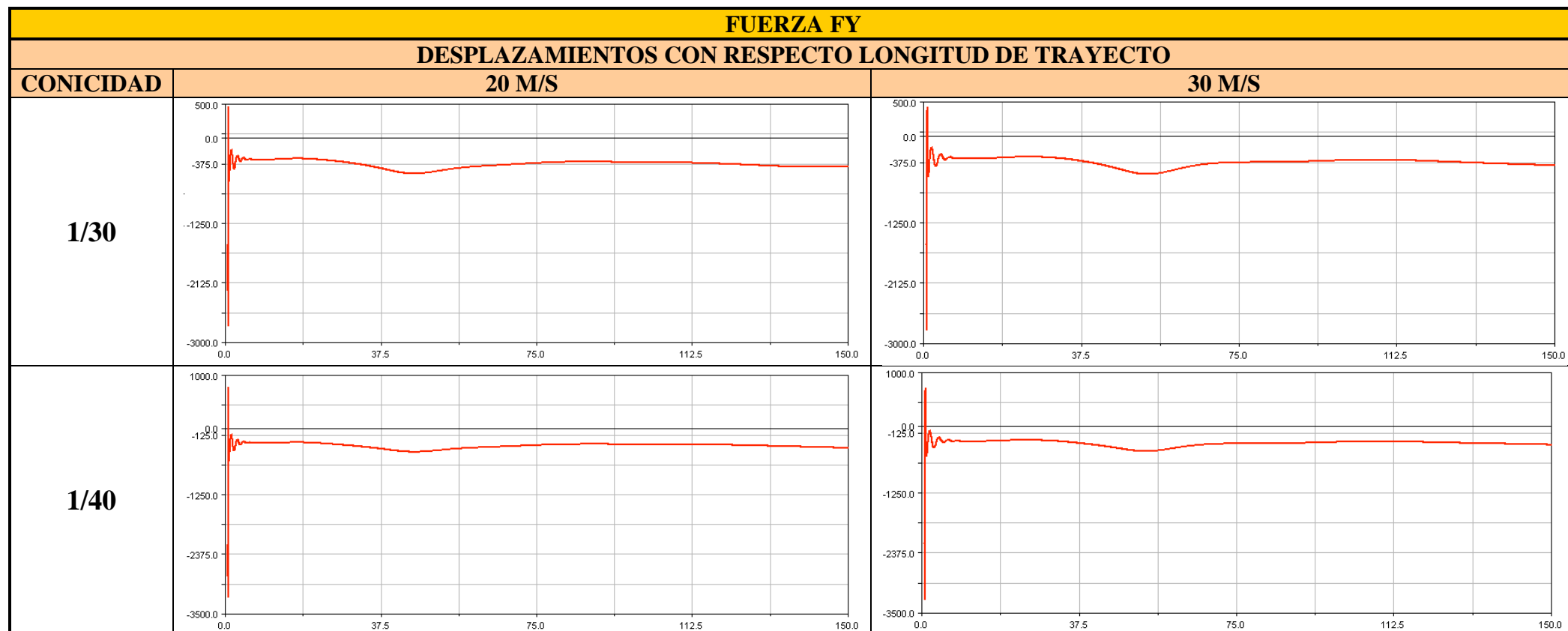
## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Observando los resultados obtenidos en los análisis, se puede concluir que a medida que disminuimos la conicidad de las ruedas, los picos iniciales que se obtienen son cada vez menores haciendo que su amplitud también lo sea. La estabilización se produce más tarde a medida que disminuimos la inclinación del perfil, ya que el reparto de fuerzas en dirección Y.

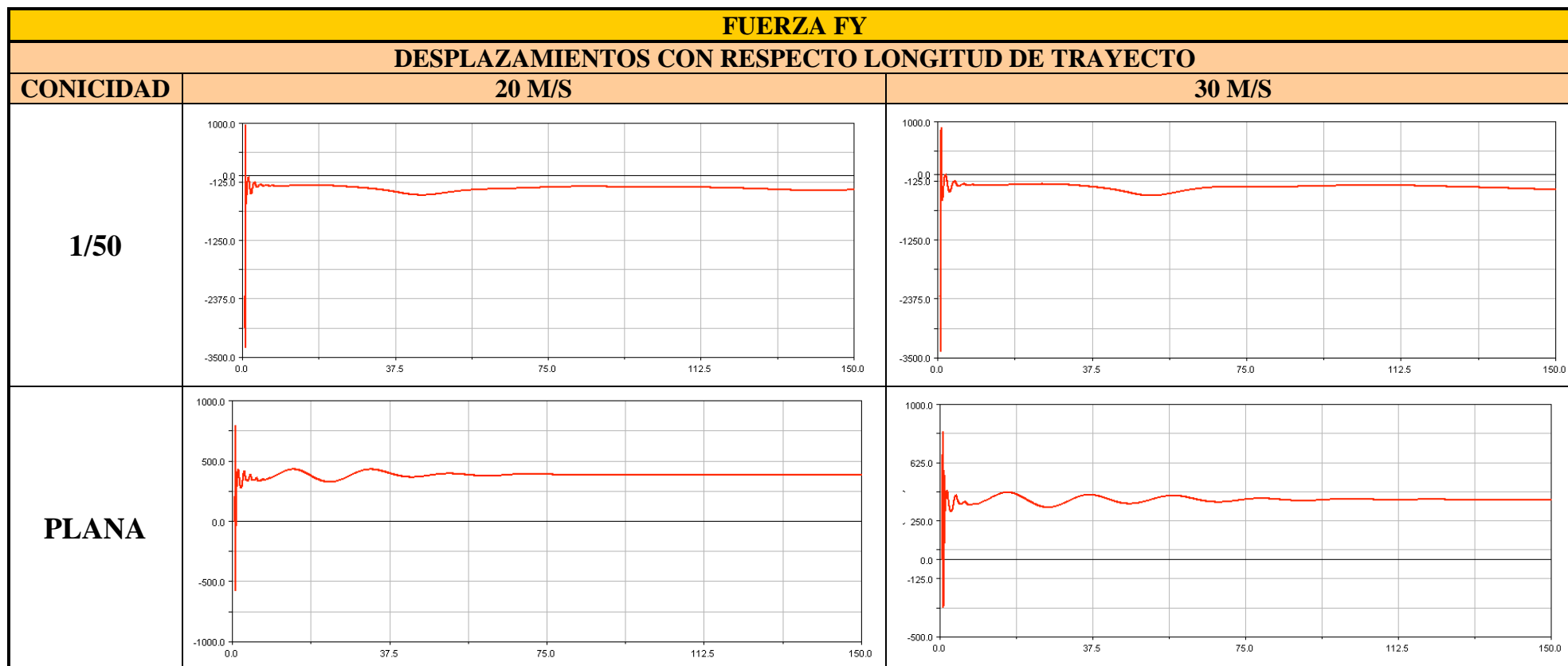
Tabla 31: Fuerzas  $F_y$  en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.

FUERZA FY		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 32: Fuerzas  $F_y$  en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.*



*Tabla 33: Fuerzas  $F_y$  en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.*





### III. FUERZA FZ

Las gráficas de la fuerza Fz se representan en la tabla 34. El eje de ordenadas representa la fuerza en dirección Z que es la dirección vertical.

La masa que se ha considerado para el vehículo ferroviario es:

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ vagón de } 63.000 \text{ kg} \\ 2 \text{ bogies de } 8920 \text{ kg} \end{array} \right\} = 80.840 \text{ kg}$$

*Ecuación*

33

Al repartirse la carga en dos bogies, es decir 8 ruedas queda  $10.105 \text{ kg} \rightarrow 99.130 \text{ N}$  por rueda aproximadamente.

#### ❖ Conicidad 1/10

Se observa que a 20 m/s la fuerza en dirección Z tiene un pico mínimo en 0 N y un máximo a  $2,02 \cdot 10^5 \text{ N}$  a 0,76 metros del origen y posteriormente se estabiliza a 6,6 metros del origen con un valor de 88.829 N. En cambio a 30 m/s, la fuerza sufre un máximo de  $2,01 \cdot 10^5 \text{ N}$  y un mínimo de 0 N. Se produce a 0,76 metros del origen también y se estabiliza a una distancia de 18,75 metros y con un valor de 88.856 N. Por tanto si aumentamos la velocidad se aumenta el valor y tiempo de estabilización del vehículo.

#### ❖ Conicidad 1/20

Con esta conicidad a 20 m/s se obtienen máximo de  $1,89 \cdot 10^5 \text{ N}$ , y mínimo de 0 N. Se produce a una distancia de 0,70 metros y se estabiliza recorrido 5,1 metros del trayecto con un valor de 89.038 N. Si aumentamos la velocidad a 30 m/s, la estabilización se consigue con un valor de 88.813 N y a 9,83 metros. El máximo obtenido es de  $2,01 \cdot 10^5 \text{ N}$ , con un mínimo de 0 N también. Es decir al aumentar la velocidad con esta conicidad se desfavorece el comportamiento dinámico en esta dirección de nuestro vehículo.

#### ❖ Conicidad 1/30

En ambas velocidades se producen los mismo máximos y mínimos, a  $1,21 \cdot 10^5 \text{ N}$  y a 40.000 N, pero a 20 m/s se llega a estabilizar a 5,24 metros y a 30 m/s 5,27 metros es decir prácticamente igual y con un valor también similar de 89.361 N.

#### ❖ Conicidad 1/40

En este caso, sucede igual que en el anterior los picos son similares en ambas velocidades y la distancia y valor de estabilización son prácticamente idénticos de valor 12,6 metros y 89.187 N.

### ❖ Conicidad 1/50

Analizando las gráficas nos damos cuenta de que los valores máximo y mínimo alcanzado al inicio de la simulación son los mismos para las dos velocidades de valor y en ambas se estabiliza con un valor de 88.956 N difiriendo únicamente en la distancia recorrida antes de la estabilización, para 20 m/s será de 149 metros y para 30 m/s de 259 metros.

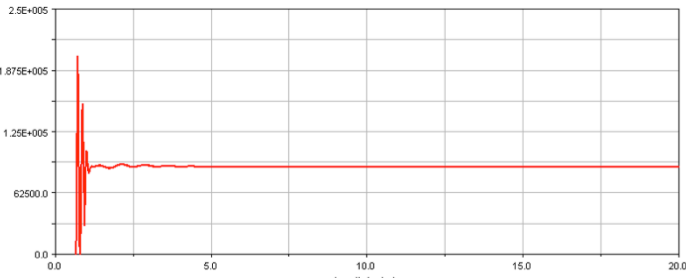
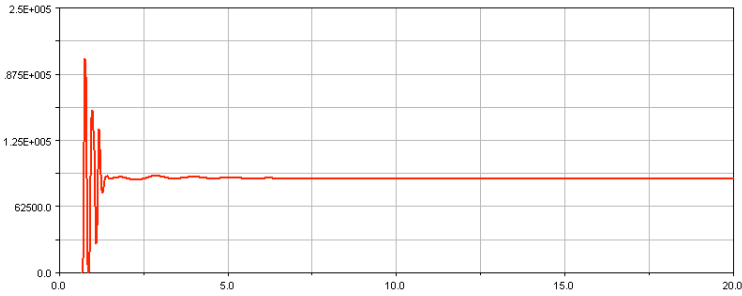
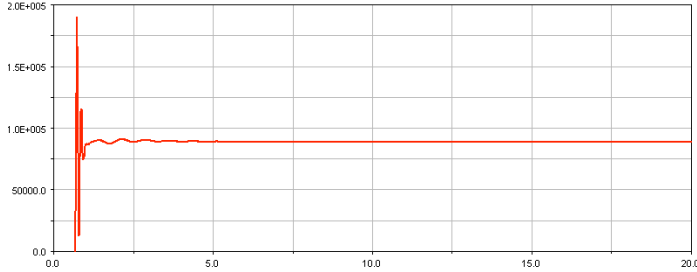
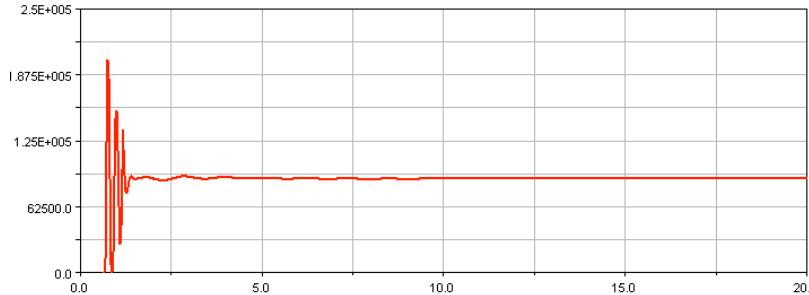
### ❖ Conicidad rueda plana.

Como lleva ocurriendo en los demás análisis la conicidad plana nos ofrece un período de estabilización mucho más corto que en las demás conicidades, para ambas velocidades la oscilación inicial se produce entre los valores de  $1,8 \cdot 10^5$  N y 0 N. La única diferencia entre ambas velocidades, al igual que en las conicidades es la distancia recorrida antes de la estabilización,. En este caso para 20 m/s es de 10,19 metros mientras que para 30 m/s es de 6,47 metros.

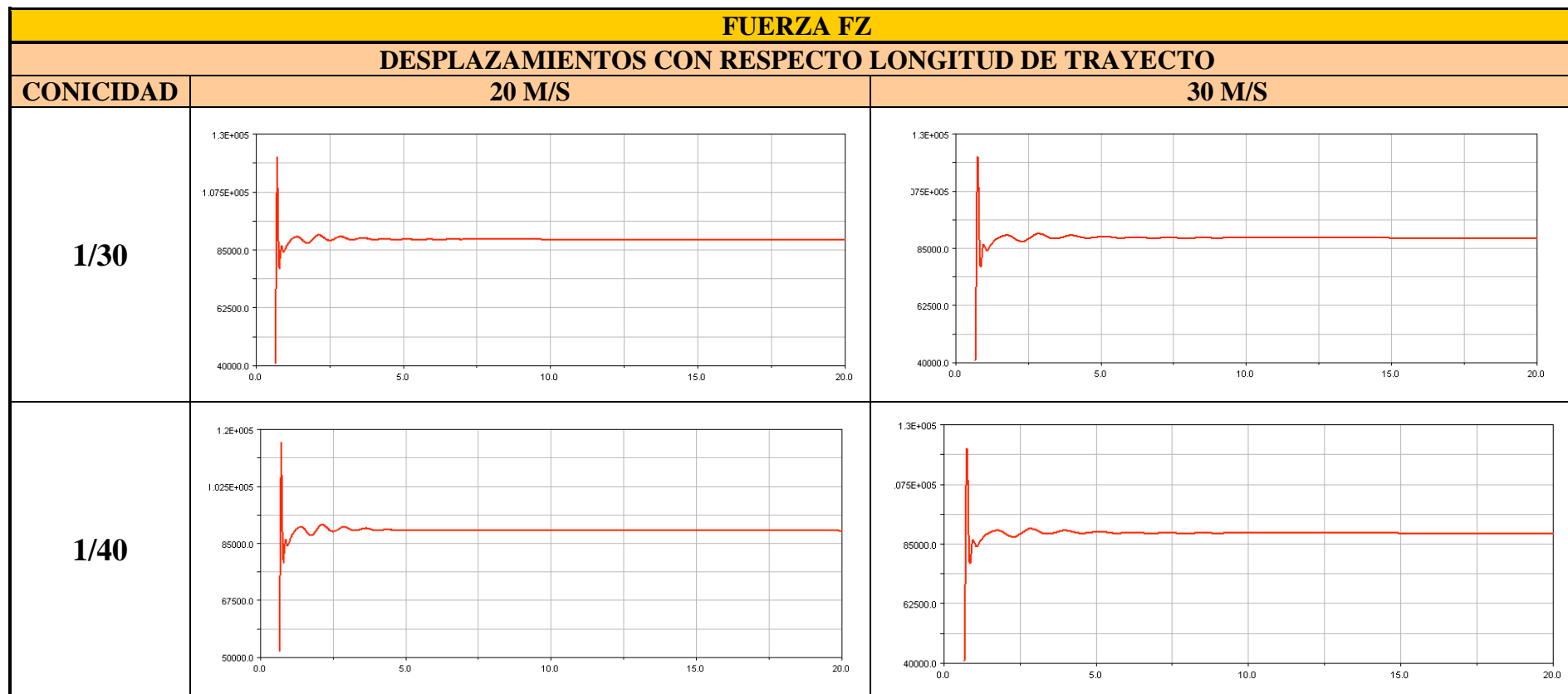
## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Con los resultados descritos llegamos a la conclusión que al aumentar la velocidad longitudinal de nuestro vehículo se aumenta el período de estabilización y cuanto menor es la pendiente del perfil de las ruedas, mayor es esta distancia, a excepción de la rueda cuya conicidad es plana cuyos resultados son más favorables.

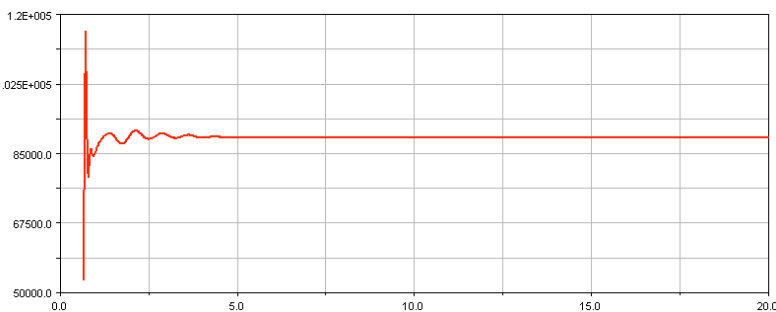
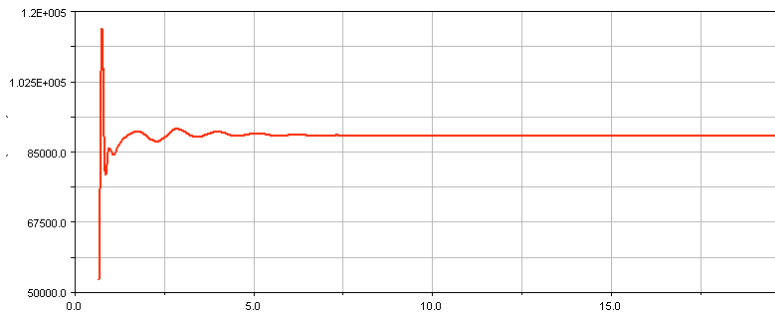
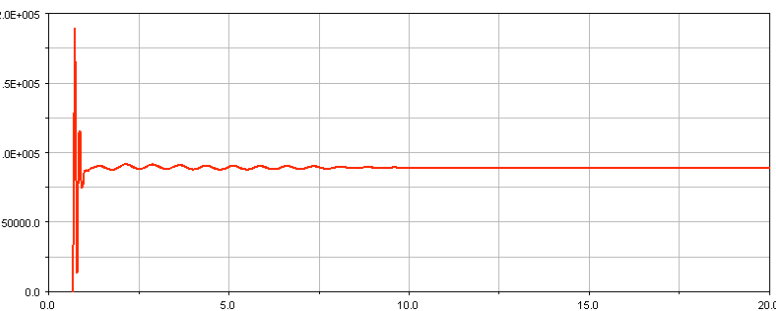
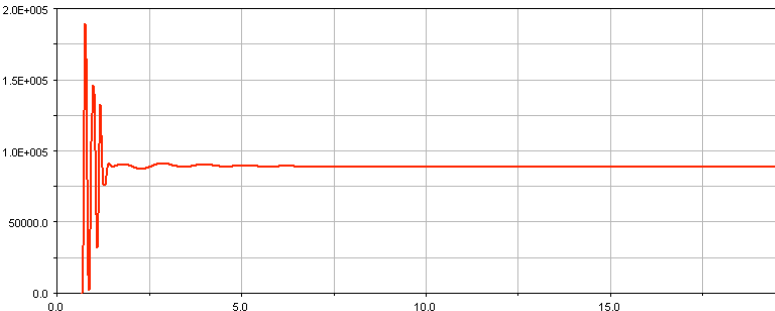
Tabla 34: Fuerzas Fz en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.

FUERZA FZ		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 35: Fuerzas  $F_z$  en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.*



*Tabla 36: Fuerzas  $F_z$  en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.*

FUERZA FZ		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/50		
PLANA		

## **MOMENTOS**

### **I. MOMENTO MX**

Las gráficas del momento Tx se representan en las *tablas*. El eje de ordenadas representa el momento en dirección X que es la dirección que sigue el tren.

#### **❖ Conicidad 1/10**

A velocidad de 20 m/s se aprecia una oscilación entre 2.690 y -1.051 Nm, estabilizándose a 503 Nm en una distancia de 23 metros. Analizando ahora a velocidad de 30 m/s, se observa una disminución en el intervalo de oscilación, en este caso se ubica el máximo en 2.378 Nm y el mínimo en -621 Nm. Se estabilizará a una distancia de 27 metros pero con un valor de 500, menor que a 20 m/s. Por tanto se puede considerar que el comportamiento es mejor a 30 m/s que a 20 m/s.

#### **❖ Conicidad 1/20**

En el caso de conicidad 1/20, se observa también que el comportamiento mejora a velocidad de 30 m/s que a 20 m/s, ya que la estabilización se consigue a 237 metros cuando se circula a 20 m/s, y a 30 metros cuando se circula a 30 m/s, difiriendo el valor de estabilidad en 862 Nm, siendo a 20 m/s de 498 Nm. Se aprecia que al aumentar la conicidad mejoran los resultados obtenidos, ganando en estabilidad y disminuyendo la carga soportada, en este caso en forma de momento.

#### **❖ Conicidad 1/30**

En ambas velocidades se obtienen valores iniciales similares de 741 Nm y -592 Nm, estabilizándose el momento Tx en un valor de 430 Nm en ambas velocidades y a una distancia de 285 metros para 20 m/s, y de 310 metros para 30 m/s, es decir al aumentar la velocidad se aumenta también el tiempo de estabilización del momento Tx en el vehículo.

#### **❖ Conicidad 1/40**

Sucede lo mismo para la conicidad 1/40 donde los valores máximos alcanzados en ambas velocidades son de 938 Nm y de -767 Nm, y estabilizándose ambas velocidades en un valor de 495 Nm y a una distancia de 376 metros para la velocidad de 20 m/s y de 400 metros para la de 30 m/s. Se observa que según se disminuye la inclinación del perfil de la rueda la variación de la velocidad prácticamente no influye en los valores del momento, sólo en el tiempo de estabilización.

#### **❖ Conicidad 1/50**

Con esta conicidad sucede igual que en las anteriores, en ambas velocidades se obtienen valores de oscilación inicial máximos iguales. Estos valores son 1.089 Nm y -

766,21 Nm. Se observa que a 20 m/s se estabiliza a 204 metros del origen y a 30 m/s a 251 metros. Ambas lo hacen a un valor de 636 Nm.

#### ❖ **Conicidad rueda plana.**

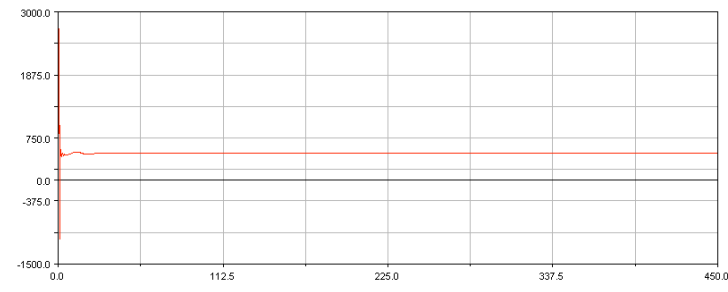
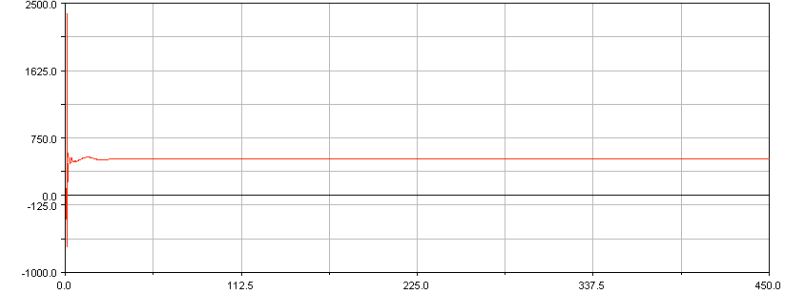
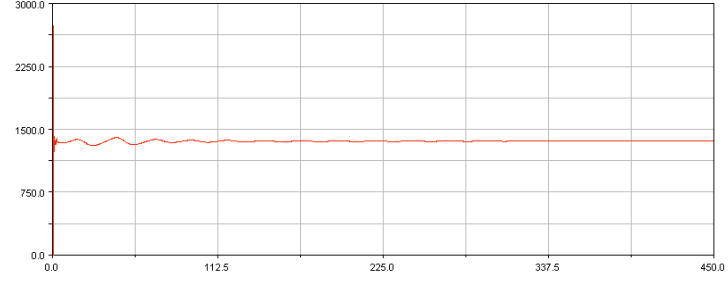
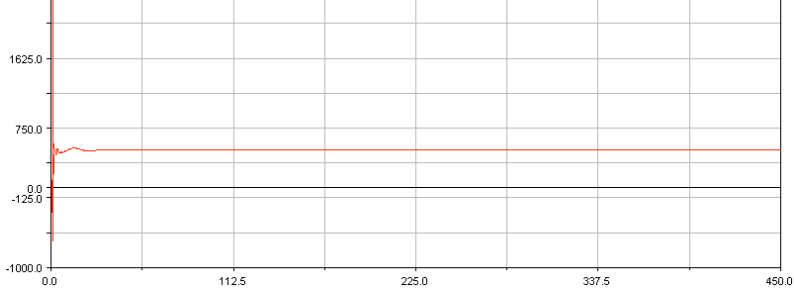
En este caso podemos apreciar como para ambas velocidades se obtienen valores casi idénticos, sólo cambia la distancia de estabilización, siendo a 20 m/s a 60 metros del origen, y a 30 m/s a 68 metros con un valor ambas de 797 Nm. Los valores máximo y mínimo de la oscilación inicial son de 1784 Nm y -22 Nm.

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Como hemos visto en las gráficas de los resultados, en todas las conicidades se obtienen una estabilización temprana. Nos damos cuenta que a medida que disminuimos nuestra conicidad, la distancia de estabilización aumenta hasta que llegamos a conicidad 1/40 donde a partir de ésta la estabilización va disminuyendo.

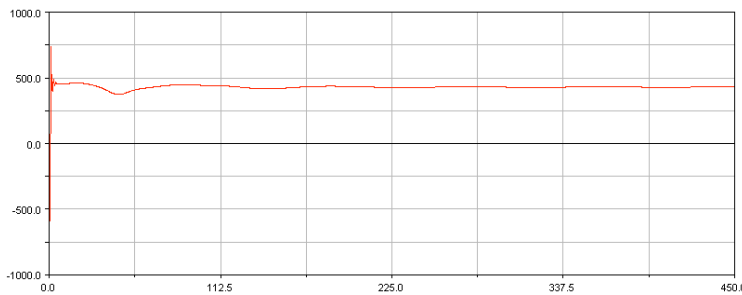
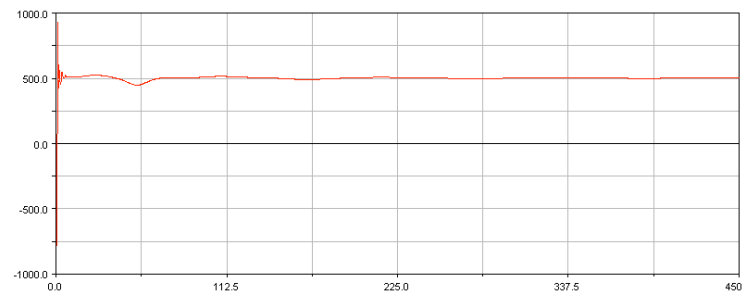
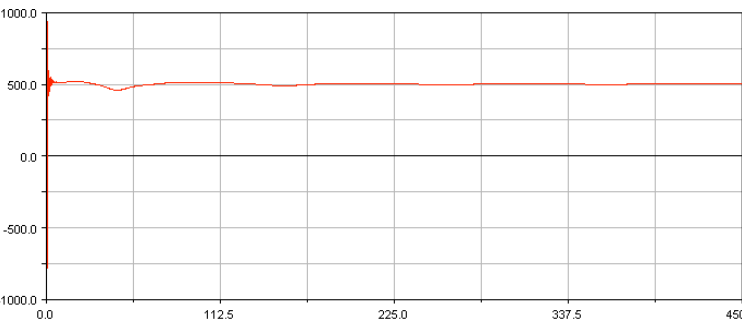
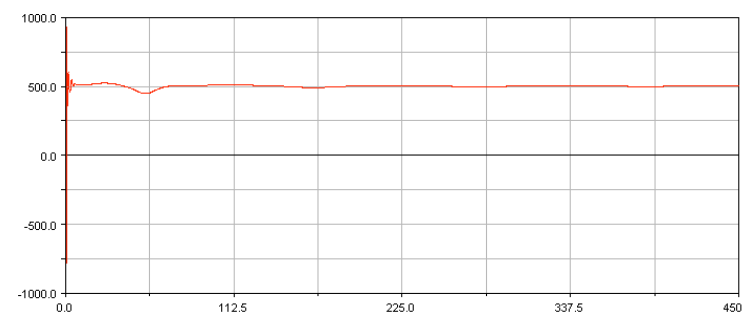
Como ha sucedido con los demás análisis tenemos el caso especial de conicidad plana donde se ha obtenido que el período de estabilización es mucho menor debido al que el movimiento de lazo es prácticamente nulo, debido a esto, también el momento de estabilización es mayor.

Tabla 37: Momentos Tx en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.

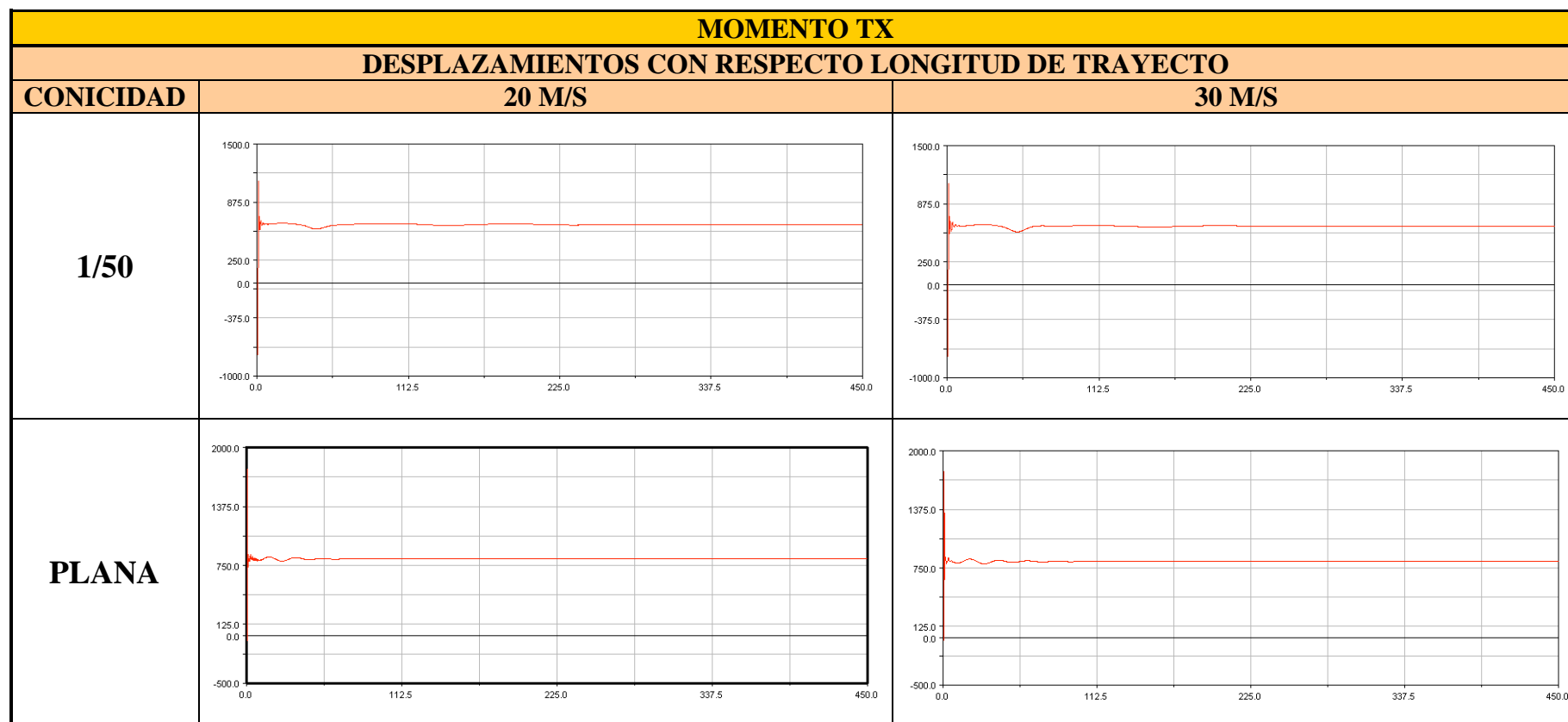
MOMENTO TX		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		



**Tabla 38: Momentos Tx en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.**

MOMENTO TX		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/30		
1/40		

**Tabla 39: Momentos Tx en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.**



## II. MOMENTO MY

Las gráficas del momento  $T_y$  se representan en las *tablas*. El eje de ordenadas representa el momento en dirección Y que es la dirección lateral de la vía.

### ❖ Conicidad 1/10

El resultado de la oscilación inicial obtenida para una velocidad de 20 m/s se produce entre valores de 1.816 Nm y -5.000 Nm, estabilizándose en 234 Nm a una distancia de 30 metros.

Comprobando a 30 m/s, nos damos cuenta de que el intervalo inicial de oscilación varía, en este caso, entre 2000 Nm y -4183 Nm, estabilizándose a una distancia de 38 metros, mayor que en el caso de velocidad 20 m/s pero con un valor de 144 Nm, por lo que es más favorable.

### ❖ Conicidad 1/20

A velocidad de 20 m/s con conicidad de 1/20, se obtiene una oscilación inicial entre 1.756 Nm y -4.453 Nm. Se estabiliza en 204 Nm y a una distancia de 335 metros. Si aumentamos la velocidad a 30 m/s se obtiene que el período de estabilización es menor, llegando a él a una distancia de 38 metros y con un valor de 115 Nm menor que anteriormente. Por tanto se consigue un mejor comportamiento. También se obtiene que la oscilación inicial se encuentre con máximo de 2.000 Nm y mínimo de -4.153 Nm.

### ❖ Conicidad 1/30

Al igual que en el momento  $T_x$ , se obtiene valores casi idénticos de picos iniciales 1.327 Nm y de -2.835 Nm, y en ambas velocidades se estabilizan en un valor de momento  $T_y$  de 64.61 Nm pero a 20 m/s se produce a una distancia de 373 metros y a 30 m/s de 261 metros, es decir en este caso al aumentar la velocidad disminuye el período de estabilización.

### ❖ Conicidad 1/40

Los picos máximos obtenidos al inicio del trayecto en ambas velocidades son similares y de valores 1.383 Nm y los mínimos son de -3.250 Nm para una velocidad de 20 m/s y de -2.868 para la de 30 m/s, es decir al aumentar la velocidad disminuye la amplitud de onda inicial. El valor de estabilización es el mismo para ambas velocidades, 64,95 Nm, sin embargo las distancias son distintas, para la velocidad de 20 m/s es de 315 metros y para la de 30 m/s es de 515 metros.

### ❖ Conicidad 1/50

Con esta inclinación de perfil obtenemos para la velocidad de 20 m/s picos de oscilación inicial de 1.360,5 Nm y -3.221,9 Nm y una estabilización a 334 metros y con valor de 68 Nm. Para la velocidad de 30 m/s observamos que la oscilación inicial tiene una amplitud cuyos máximos son 1.360,5 Nm y -2.902 Nm y consigue estabilizarse con un valor de 68 Nm a una distancia de 650 metros.

Como podemos ver, según vamos disminuyendo la conicidad, el valor de estabilización disminuye su valor, pero la distancia aumenta. En relación a la velocidad se puede observar que la tendencia a seguir es una disminución del valor mínimo de oscilación inicial y un aumento de la distancia recorrida antes de la estabilización total.

#### ❖ **Conicidad rueda plana.**

Con respecto a la conicidad plana obtenemos unos valores de oscilación inicial similares a las demás conicidades. Para 20 m/s, 1.651 Nm y -4.450 Nm y para 30 m/s de 2.173 Nm y -3.742,2 Nm. La distancia recorrida para llegar a estabilizarse a 20 m/s es de 112 metros con un valor de 243 Nm y para 30 m/s es también de 243 Nm pero a una distancia de 100 metros.

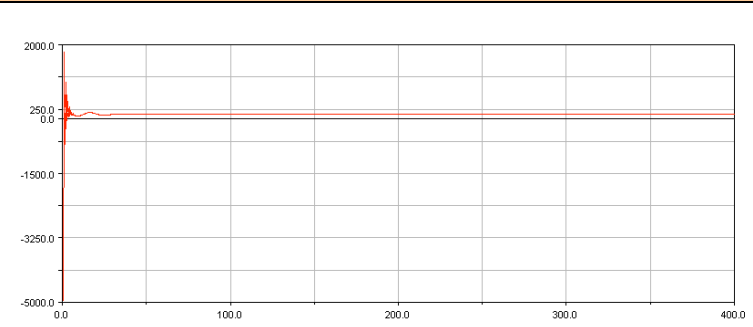
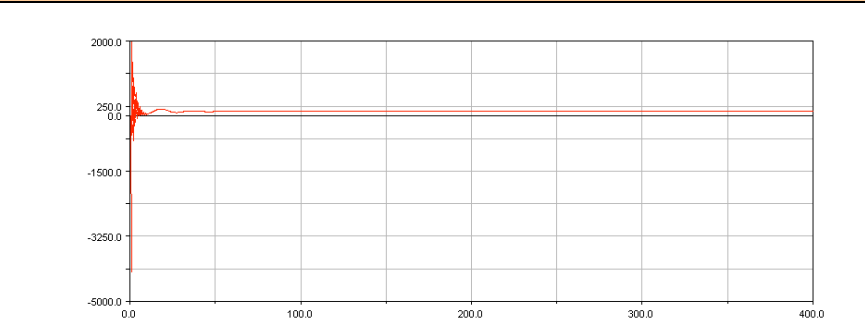
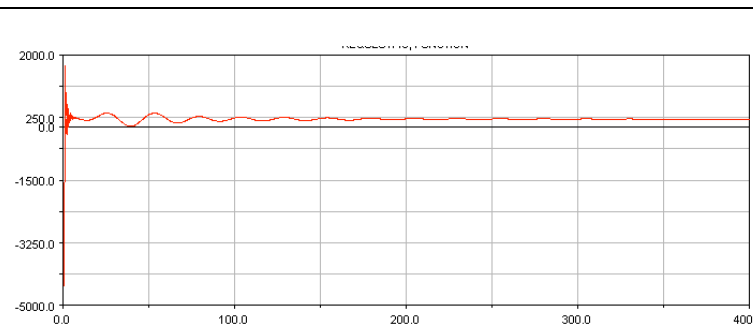
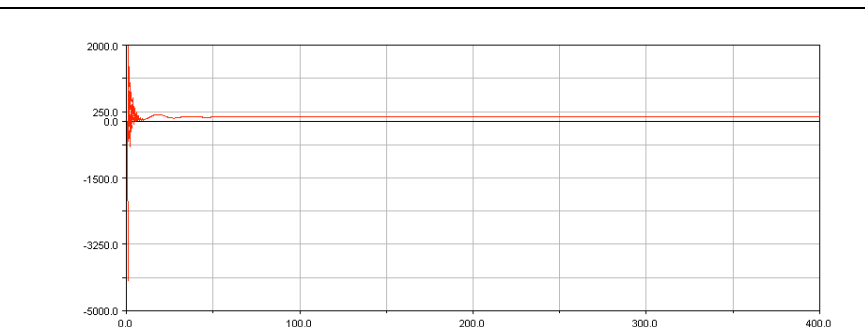
En este caso al contrario que en las demás conicidades, al aumentar la velocidad, disminuye la distancia de estabilización.

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

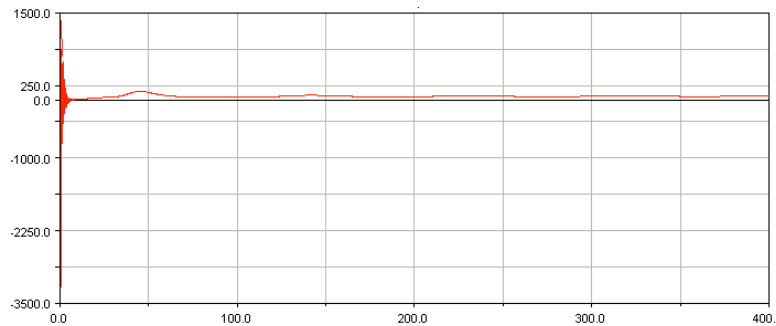
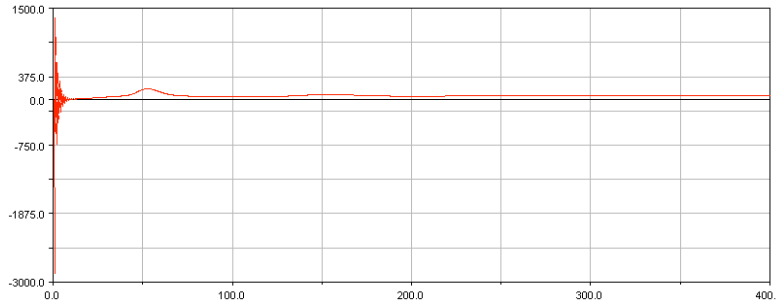
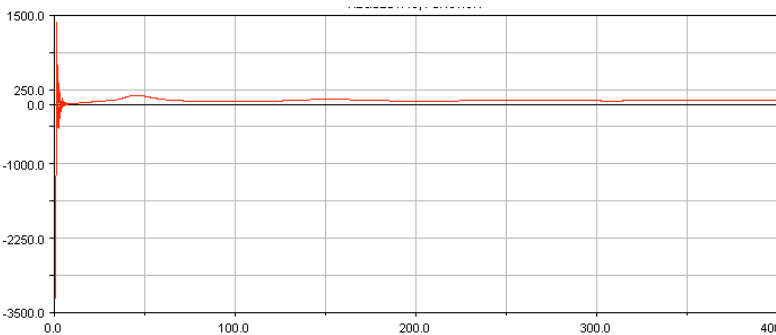
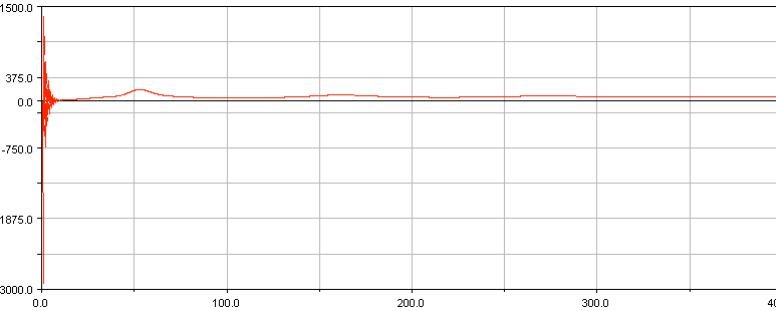
Fijándonos en los momentos respecto del eje Y ( $T_y$ ), nos damos cuenta que cuanto más disminuimos la conicidad mayor es la distancia que debemos recorrer antes de llegar a la estabilización. Sin embargo a partir de la conicidad 1/30 la estabilización se consigue con un momento  $T_y$  menor, lo que es favorable, ya que será menor la carga que deben soportar las partes del vehículo involucradas.

En relación a la velocidad se llega a la conclusión que, exceptuando las conicidades 1/10 y 1/20, los valores de estabilización se mantienen constantes pero la distancia aumenta al aumentar la velocidad, a excepción de la conicidad plana que disminuye.

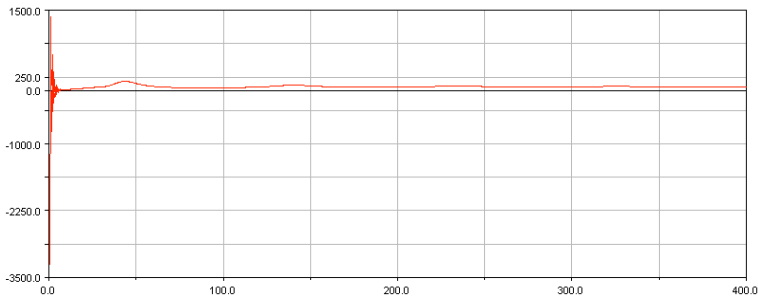
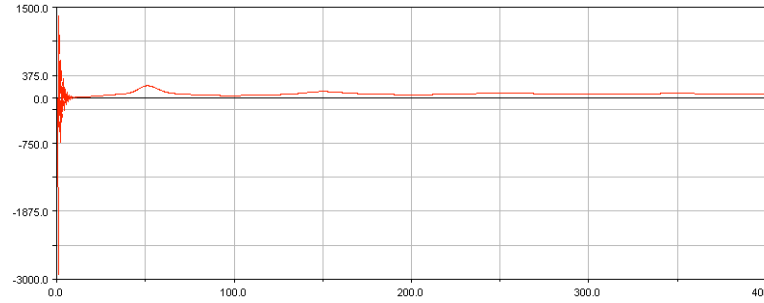
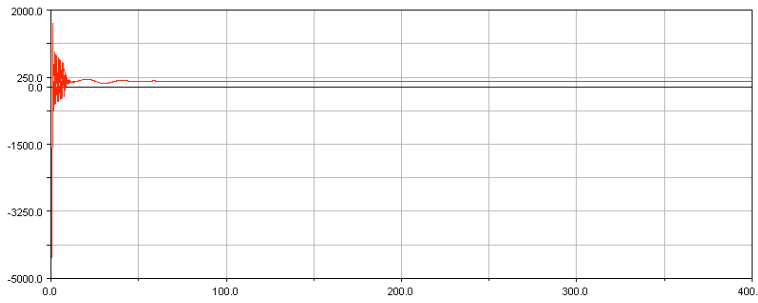
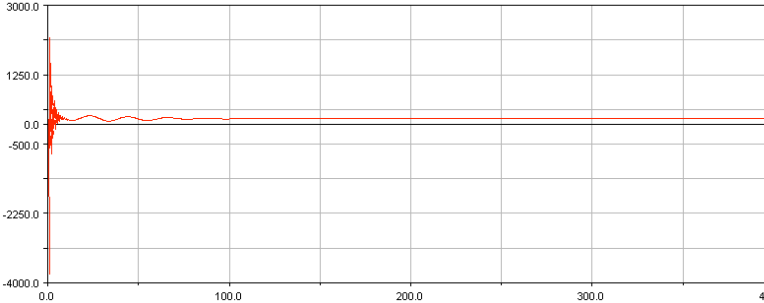
Tabla 40: Momentos *Ty* en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.

MOMENTO TY		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICID AD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 41: Momentos  $T_y$  en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.*

MOMENTO $T_y$		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/30		
1/40		

*Tabla 42: Momentos  $T_y$  en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.*

MOMENTO $T_y$		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/50		
PLANA		

### III. MOMENTO MZ

Las gráficas del momento  $T_z$  se representan en las *tablas* . El eje de ordenadas representa el momento en dirección Z que es la dirección vertical de la vía.

#### ❖ Conicidad 1/10

Como sucede en los casos anteriores, al aumentar la velocidad de 20 m/s a 30 m/s se obtiene un desplazamiento de la onda inicial positivo respecto del eje que define el momento  $T_z$  de un valor de 200 Nm. La estabilización se obtiene a 32 metros y con valor de 0,06 Nm, para 30 m/s y para 20 m/s se estabiliza a 0,0682 Nm y a 62 metros del origen. Se comprueba que con esta conicidad es aconsejable utilizar una velocidad de 30 m/s.

#### ❖ Conicidad 1/20

Como ocurre con el caso de la conicidad 1/10, cuando se aumenta la velocidad a 30 m/s se obtienen mejores prestaciones. La estabilidad se alcanza a 31 metros y con un valor de 0,076 Nm, mientras que a 20 m/s se obtiene 263 metros y a 1.79 Nm. Siendo además el máximo y mínimo alcanzado a 30 m/s es mucho menor, 2,62 Nm y -5,06 Nm cuando a 20 m/s obtenemos que el máximo es 15,35 Nm y el mínimo -38,63 Nm.

#### ❖ Conicidad 1/30

Se observa que para ambas velocidades el valor máximo obtenido es el mismo y de valor 19,69 Nm, como a sucedido con esta conicidad en el resto de momentos sobre el vehículo, y los valores mínimos para 20 m/s y 30 m/s respectivamente son de -45 Nm y -41 Nm. Esto quiere decir q conforme disminuimos la conicidad los valores iniciales que se obtienen son mayores y por tanto más desfavorables.

La estabilización se consigue con un valor de 0,86 Nm y a una distancia de 409 metros para la velocidad de 20 m/s y de 445 metros para la de 30 m/s.

#### ❖ Conicidad 1/40

Siguiendo la tendencia observada, los valores máximos son similares en ambas velocidades de valor 20, 21 Nm y las mínimas son distintas con valores de -48,9 Nm para 20 m/s y de -43,7 Nm para la de 30 m/s, siendo estos mayores que en las conicidades anteriores. La estabilización se consigue a una distancia de 363 metros para la velocidad de 20 m/s y a 392 m/s para la velocidad de 30 m/s. Ambas a alcanzan un valor de 1,08 Nm.

#### ❖ Conicidad 1/50

Se observa que las gráficas son similares al momento  $T_y$ , únicamente cambia los valores del momento. Para la velocidad de 20 m/s obtenemos una oscilación inicial entre 24,15 Nm y -54 Nm. Estabilización a 246 metros y con un valor de 1,29 Nm. Para 30 m/s la oscilación es entre 23,4 Nm y -50 Nm y se estabiliza en 1,29 Nm pero a 265 metros.



**❖ Conicidad rueda plana.**

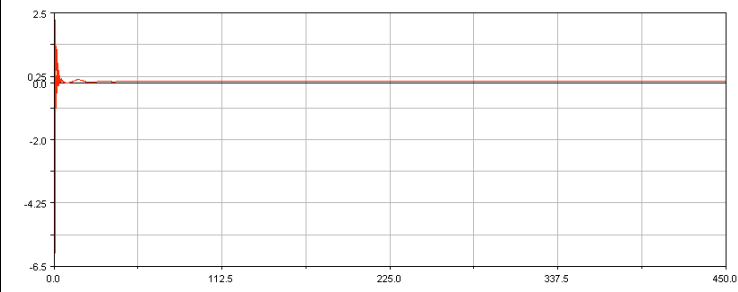
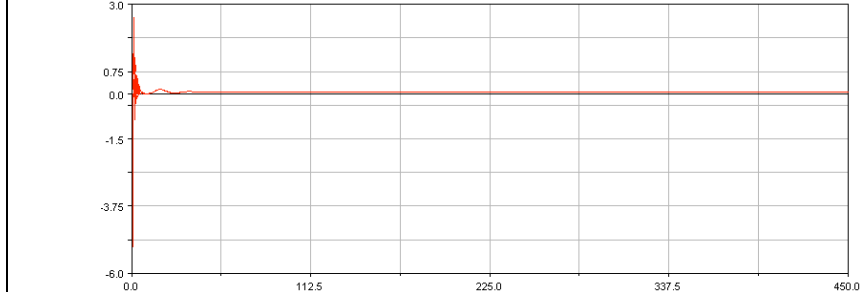
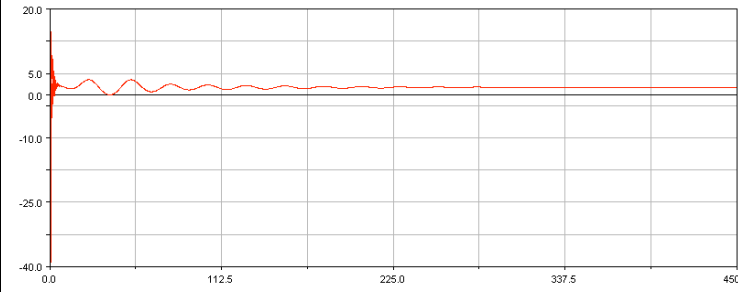
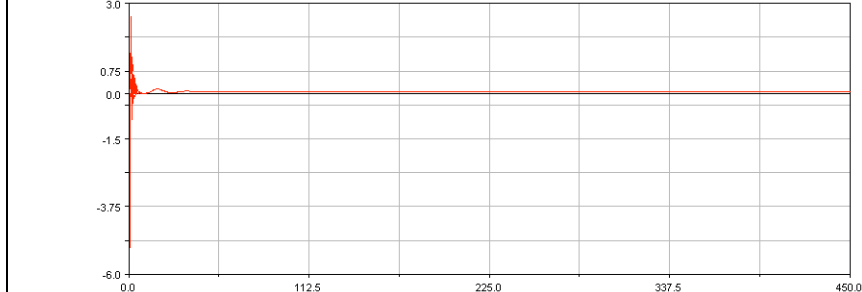
Aquí las gráficas también son similares a las del momento  $T_y$ . A 20 m/s tenemos valores máximo y mínimo inicial de 25 Nm y -70 Nm y para la velocidad de 30 m/s 34 Nm y -58 Nm. Ambas se estabilizan en 2,42 Nm pero a 20 m/s se produce a 73 metros y a 30 m/s a 124 metros. Sin embargo se observa una menor frecuencia de oscilación, lo que conlleva una período mucho más elevado a 20 m/s que a 30 m/s. A diferencia de las demás conicidades, ésta mejora al aumentar la velocidad.

**ANÁLISIS DE RESULTADOS**

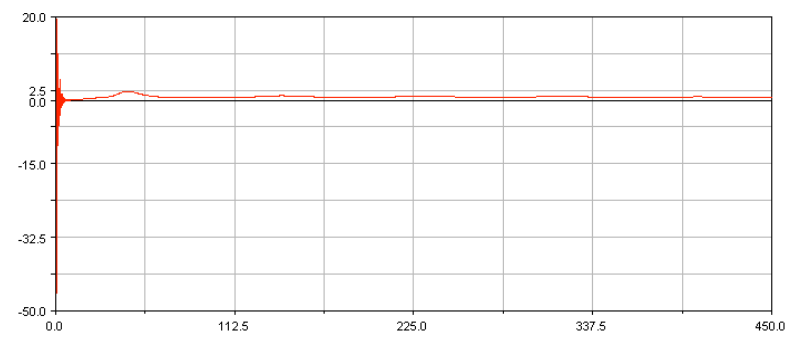
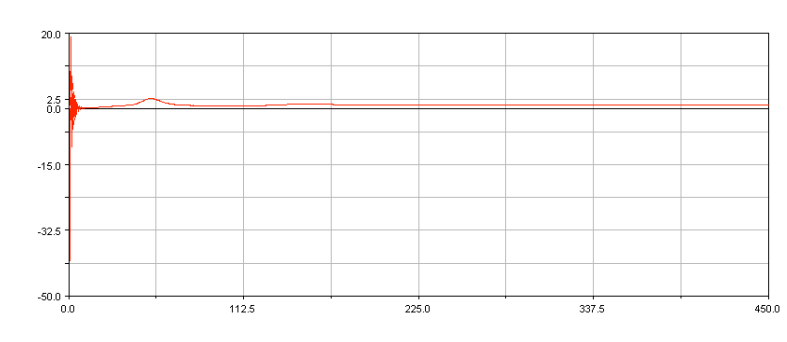
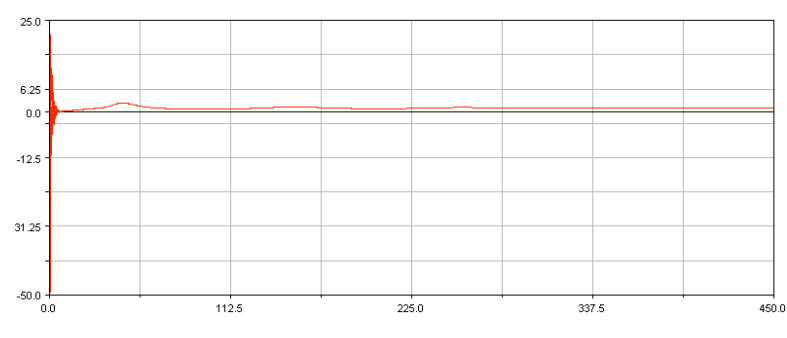
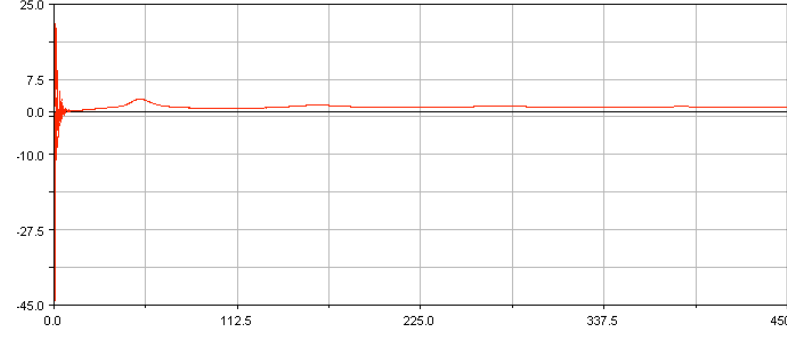
Como ha sucedido en los demás casos, la conicidad plana nos proporciona un período de estabilización menor que el resto de conicidades, debido a que hay menor movimiento de lazo lo que evita las oscilaciones, sin embargo esto también influye provocando que el valor de estabilización sea mayor.

El aumento de la velocidad provoca unos resultados más desfavorables. Las conicidades con mayor inclinación son más óptimas que las demás, exceptuando la conicidad 1/30 que es la más desfavorable.

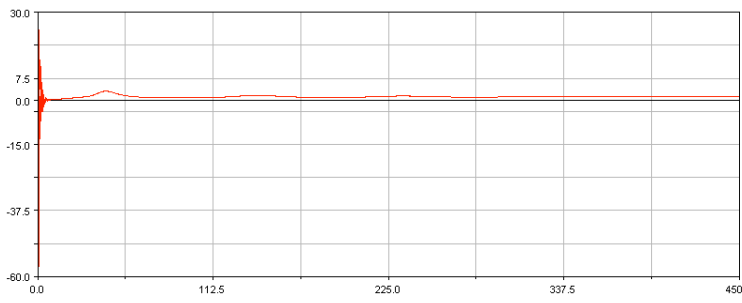
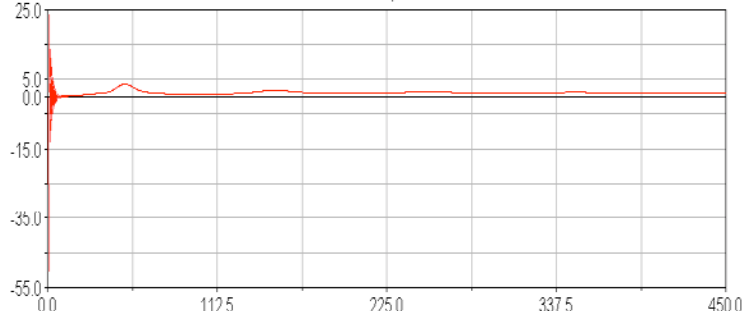
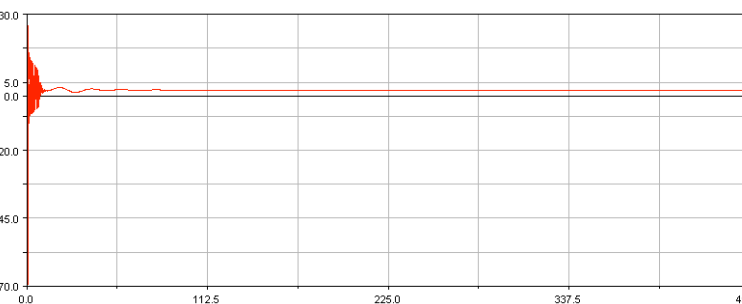
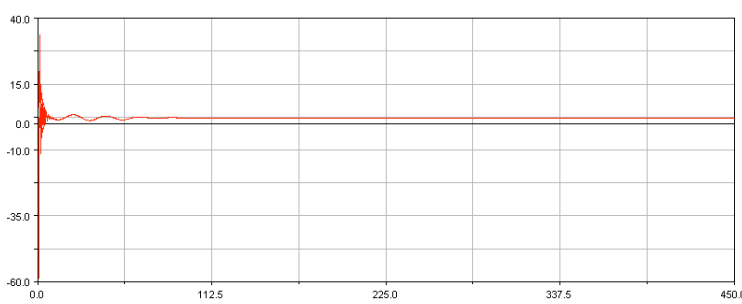
Tabla 43: Momentos  $T_z$  en tramo recto de las conicidades 1/10 ; 1/20.

MOMENTO TZ		
MOMENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

**Tabla 44: Momentos  $T_z$  en tramo recto de las conicidades 1/30 ; 1/40.**

MOMENTO TZ		
MOMENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/30		
1/40		

**Tabla 45: Momentos  $T_z$  en tramo recto de las conicidades 1/50 ; plana.**

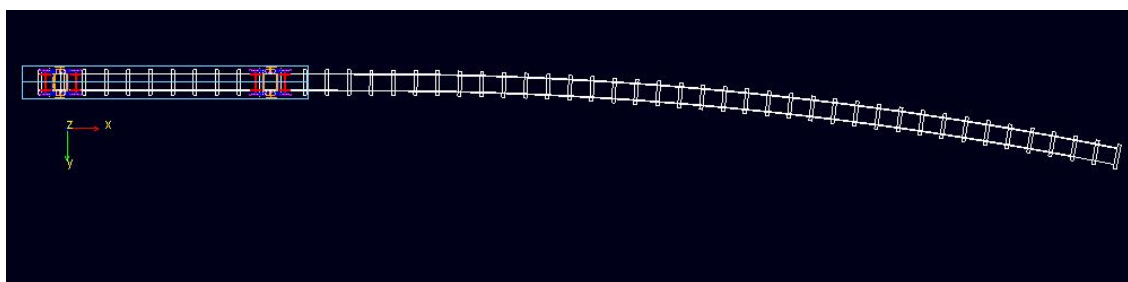
MOMENTO TZ		
MOMENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/50		
PLANA		

### 8.4.3 SIMULACIÓN EN VÍA CURVA

Durante la circulación en curva el vehículo es guiado por las fuerzas laterales entre la rueda y el carril. Estas fuerzas pueden alcanzar valores muy altos, particularmente en el caso de vehículos pesados circulando por curvas cerradas. El estado de régimen permanente en curva puede resolverse mediante integración temporal, simulando la circulación sobre una vía desde un tramo recto hasta un tramo con curvatura.

A continuación se representan en sucesivas tablas las gráficas para cada hipótesis de simulación considerada en una vía de trazado curvado para que se aprecie, de una forma clara, cómo varía la simulación si se modifican la velocidad de 20 m/s a 30 m/s y también al modificar las conicidad de las ruedas del vehículo ferroviario.

Para las siguientes simulaciones se ha utilizado la siguiente vía curva, la cual tiene una longitud de 600 metros y en su totalidad tiene un radio de curvatura 320 metros. Entre 0 metros y 100 metros no tiene curvatura y a partir de 100 metros tiene un radio de curvatura de 320 metros. En la *figura 64*, se muestra el vehículo montado en el trayecto.

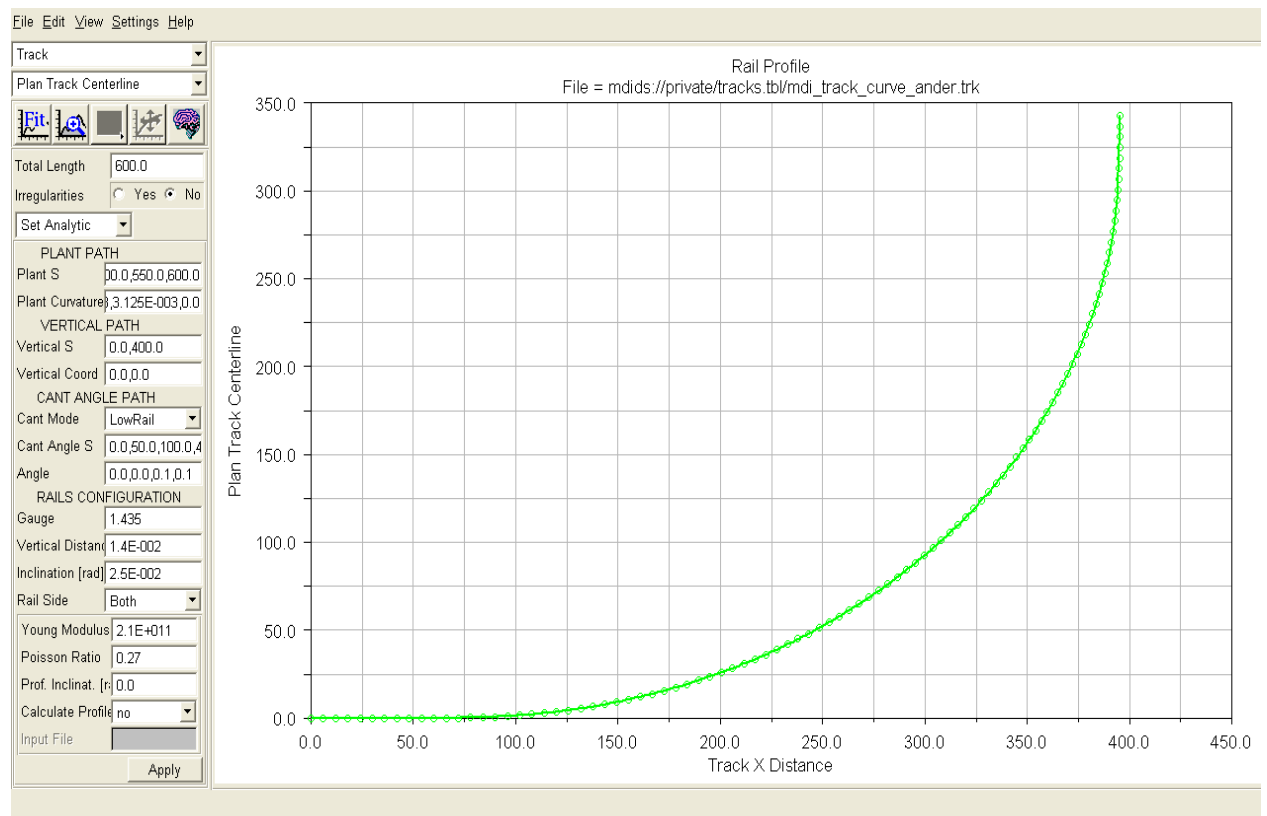


**Figura 64:** Trazado de la vía curva.

La vía dispone en la zona de curvatura de un peralte, es decir, una pendiente transversal en la plataforma de una vía férrea con el fin de compensar con una componente de su propio peso la inercia (o fuerza centrífuga, aunque esta denominación no es acertada) del vehículo, y lograr que la resultante total de las fuerzas se mantenga aproximadamente perpendicular al plano de la vía o de la calzada.

El objetivo del peralte por tanto es contrarrestar la fuerza centrífuga que impele al vehículo hacia el exterior de la curva. En este caso se ha introducido un peralte de  $1,40 \cdot 10^{-2}$  m como podemos observar en el archivo de propiedades de la vía.

Empleando *Curve Manager*, *figura 65*, se puede ver el trazado de la vía, junto a los parámetros de diseño, para la realización de estas simulaciones también empleamos un perfil de vía UIC 60 al igual que en el caso anterior.



**Figura 65: Representación de la vía curva con Curve Manager.**

El punto del vehículo sobre el que se ha realizado el estudio es el centro de la rueda izquierda, del eje frontal, del bogie delantero. En todas las gráficas se ha tomado como eje de abscisas la longitud de la vía, en concreto el raíl izquierdo.

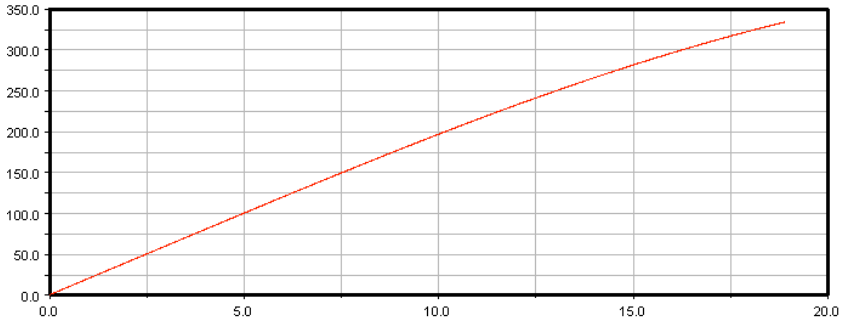
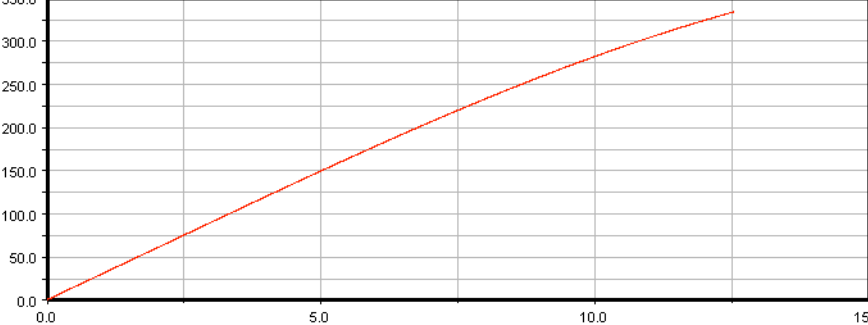
Hay que tener en cuenta que la rueda objeto de estudio pertenece a un vagón, por lo que le influye lo que suceda en el resto de las ruedas que equipa el vehículo, así como sistema de suspensión. Esto se traduce en diferentes oscilaciones que pueden apreciarse cuando el vehículo circula por la curvatura.

### **DESPLAZAMIENTO CON RESPECTO AL TIEMPO**

Las gráficas de la distancia recorrida por el vagón en función del tiempo se representan en la *tabla 46*. El eje de abscisas representa al tiempo y el eje de ordenadas la longitud de la vía X, en concreto el raíl izquierdo (*track rail left X*), en metros, no existiendo variaciones significativas entre un raíl y otro

Se puede apreciar que para recorrer una distancia de 340 metros a 20 m/s se emplea 18 segundos, y a 30 m/s se emplea 15 segundos.

Tabla 46: Tramo de vía curvo recorrido.

TRAMO DE VÍA CURVO	
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO TIEMPO	
20 M/S	30 M/S
	

## **PARÁMETROS DE CONTROL**

### **III. ACELERACIÓN**

Al igual que en el caso de vía de tramo recto, las gráficas de aceleración se van a representar en las *tablas 47, 48 y 49*. El eje de ordenadas representa la aceleración del vehículo en  $\text{m/s}^2$ . Se ha considerado que el vehículo inicia la simulación a la velocidad deseada en cada caso.

#### **❖ Conicidad 1/10**

Se puede apreciar en ambas velocidades como la aceleración tiene un máximo y un mínimo debido a las suspensiones, etc. y posteriormente va disminuyendo hasta estabilizarse en un valor de  $-0,0594 \text{ m/s}^2$ , este valor negativo que aparece se debe a que debido al rozamiento existente entre la pestaña y el raíl, este pierde velocidad, y como se ve, con una deceleración constante de  $-0,058 \text{ m/s}^2$ . En el caso de aumentar la velocidad, obtenemos una deceleración mayor del orden de  $-0,114 \text{ m/s}^2$ .

#### **❖ Conicidad 1/20**

Podemos apreciar que a  $20 \text{ m/s}$ , se obtiene que la deceleración obtenida en este caso es de  $-0,06 \text{ m/s}^2$  y si aumentamos hasta  $30 \text{ m/s}$  se obtiene una deceleración de  $-0,114 \text{ m/s}^2$ . Se obtienen resultados similares al caso anterior. El comportamiento es similar a la conicidad de 1/10.

#### **❖ Conicidad 1/30**

Podemos seguir observando como el comportamiento es similar al caso de conicidades anteriores, se produce una deceleración de  $-0,06 \text{ m/s}^2$  y si aumentamos la velocidad observamos como esta deceleración aumenta hasta  $-0,1127 \text{ m/s}^2$ .

#### **❖ Conicidad 1/40**

A  $20 \text{ m/s}$  se obtiene una deceleración de  $-0,0605 \text{ m/s}^2$  y si aumentamos la velocidad a  $30 \text{ m/s}$  obtenemos que la deceleración es del orden de  $-0,113 \text{ m/s}^2$ . Se observa que por ahora la importancia de la conicidad es mínima ya que las gráficas obtenidas son prácticamente similares.

#### **❖ Conicidad 1/50**

Al igual que en los casos anteriores se observa oscilaciones iniciales y posteriormente una deceleración de  $-0,061 \text{ m/s}^2$  cuando circula a  $20 \text{ m/s}$  y una deceleración de  $-0,112 \text{ m/s}^2$  cuando aumentamos la velocidad a  $30 \text{ m/s}$ .

#### **❖ Conicidad rueda plana.**

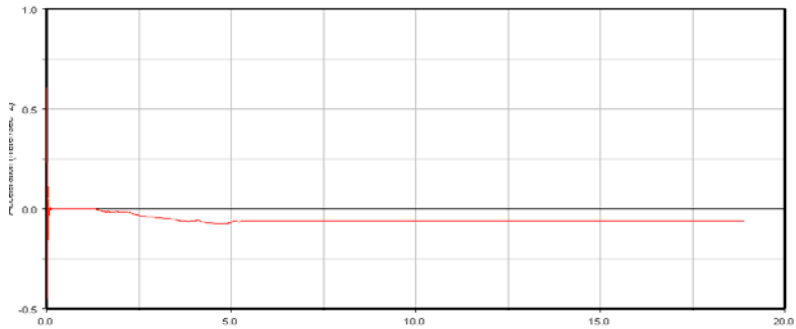
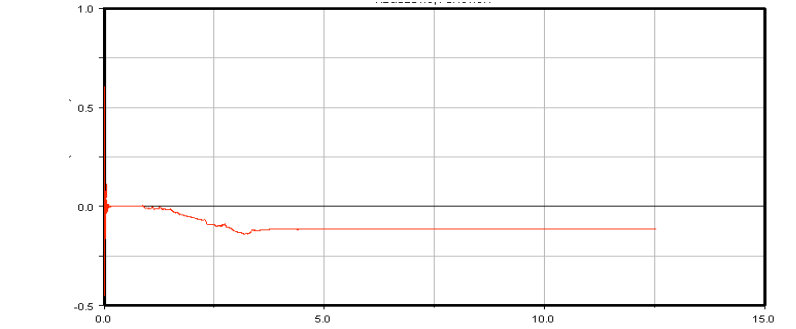
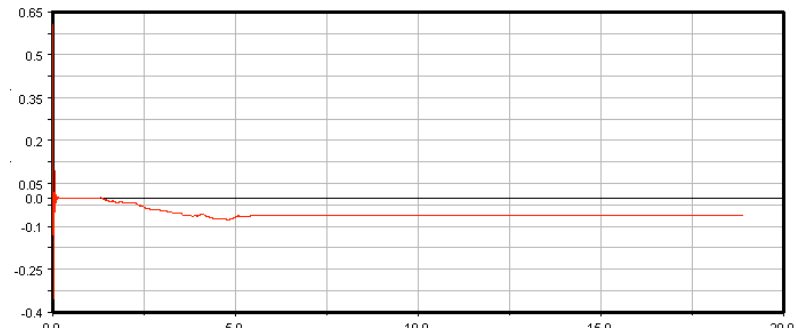
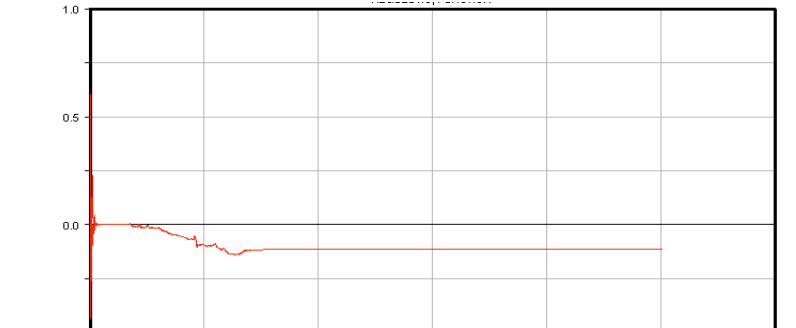
Por último, con esta conicidad se observa una deceleración de  $-0,06 \text{ m/s}^2$  a  $20 \text{ m/s}$ , y a  $30 \text{ m/s}$  una deceleración de  $-0,1134 \text{ m/s}^2$ .



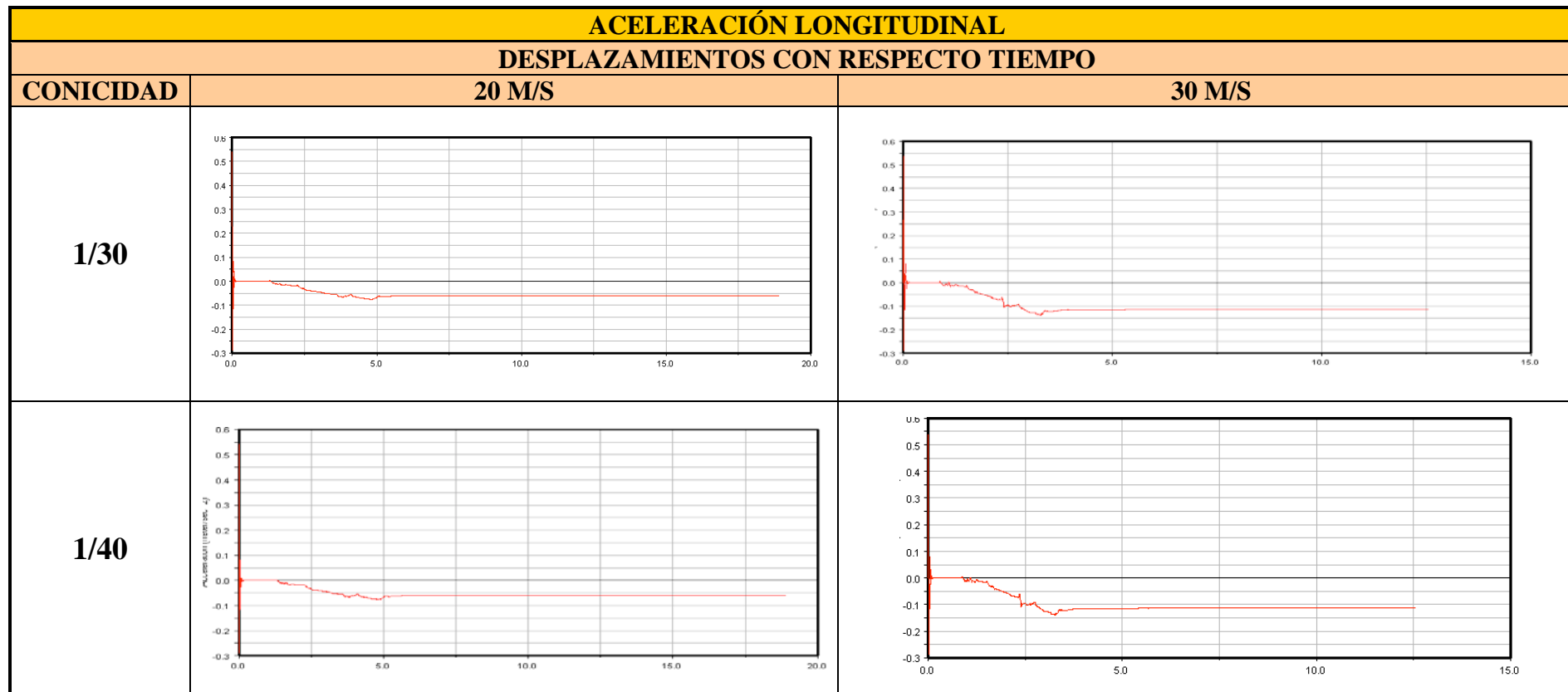
## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Como se puede apreciar en los resultados, la variación de la conicidad no afecta al comportamiento de la aceleración longitudinal del vehículo, pero sí observamos que si se aumenta la velocidad va a provocar una deceleración mayor. Como la curva creada es una curva hacia la izquierda, la fuerza centrífuga generada al tomar la curva va a provocar que la rueda izquierda se desplace hacia el exterior de la curva consiguiendo que la pestaña de dicha rueda toque el rail y por lo tanto pierda velocidad debido al rozamiento. La rueda derecha también tocará el raíl debido al movimiento de lazo, pero la mayor pérdida de velocidad se obtendrá en la rueda izquierda. Por esta razón se obtiene una deceleración.

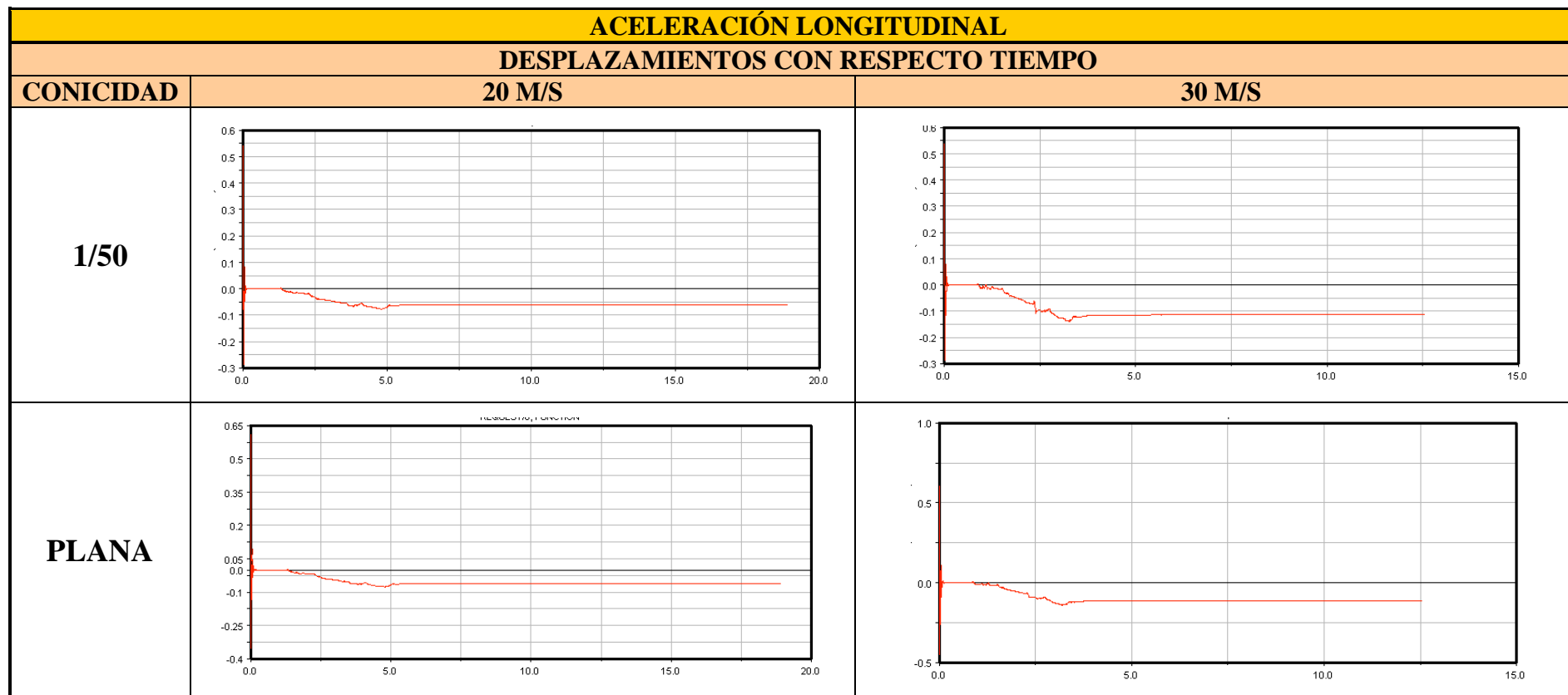
Tabla 47: Aceleración longitudinal en tramo curvo de las conicidades 1/10 ; 1/20.

ACELERACIÓN LONGITUDINAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO TIEMPO		
CONICIDA D	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 48: Aceleración longitudinal en tramo curvo de las conicidades 1/30 ; 1/40.*



*Tabla 49: Aceleración longitudinal en tramo curvo de las conicidades 1/50 ; plana.*



#### IV. VELOCIDAD

Las gráficas de la representación de la velocidad durante el trayecto de tramo recto del vehículo ferroviario Avant serie S-104, se representan en la *tablas 50, 51 y 52*.

##### ❖ Conicidad 1/10

En este caso se puede observar como debido al rozamiento existente, la velocidad disminuye hasta un valor final de 19,74 m/s cuando circula a 20 m/s, y cuando circula a 30 m/s disminuye hasta un mínimo de 29,942 m/s. Se puede apreciar claramente como a 20 m/s esta disminución es lineal mientras que si aumentamos la velocidad no es así. Sin embargo, la pérdida de velocidad es menor a 30 m/s que a 20 m/s.

##### ❖ Conicidad 1/20

Se aprecia el mismo comportamiento que en la conicidad anterior. A 20 m/s la disminución de la velocidad tiene una progresión lineal mientras que a 303 m/s no. Los valores mínimos respectivamente son: 19,75 m/s y 29,9412.

##### ❖ Conicidad 1/30

Progresión lineal en la pérdida de velocidad cuando circula a 20 m/s y cuando circula 30 m/s disminuye hasta un máximo de 24,94 m/s y después asciende, igual que en las conicidades anteriores. El mínimo obtenido a 20 m/s es de 19,762 m/s.

##### ❖ Conicidad 1/40

Mismo patrón que en las conicidades anteriores, a 20 m/s la velocidad desciende hasta 19,763 m/s y a 30 m/s alcanza una velocidad mínima de 29,74 m/s.

##### ❖ Conicidad 1/50

Igual que en los casos anteriores mismo comportamiento referente a la velocidad. A 20 m/s se obtiene un descenso hasta 19,7648 m/s y a 30 m/s se obtiene un mínimo de 29,94 m/s .

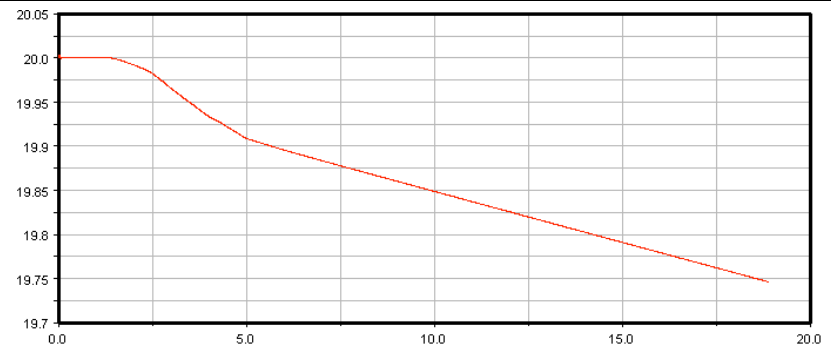
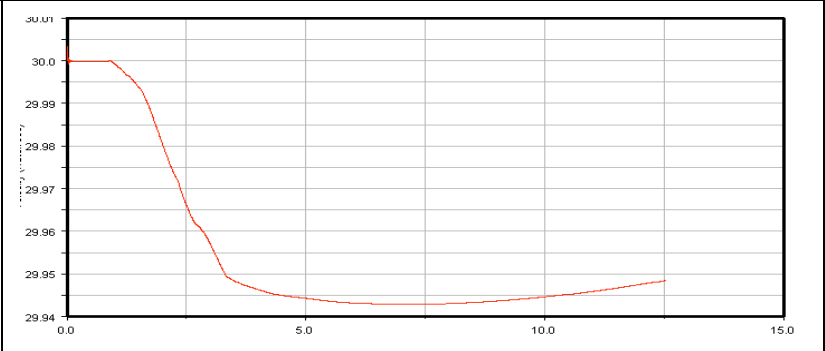
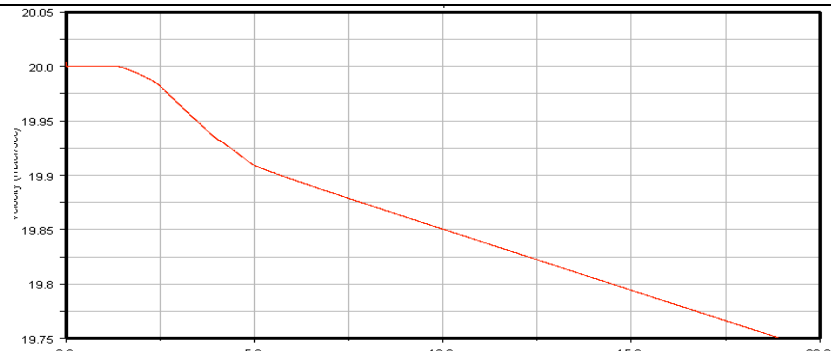
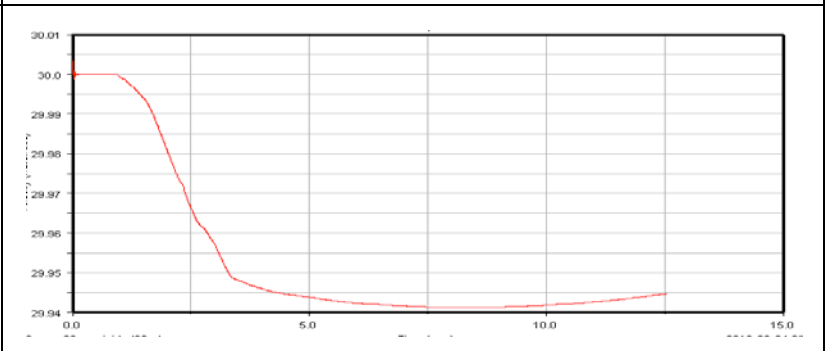
##### ❖ Conicidad rueda plana.

Alcanza un valor mínimo de 19,7609 m/s cuando circula a 20 m/s y un valor de 29,943 m/s cuando circula a 30 m/s.

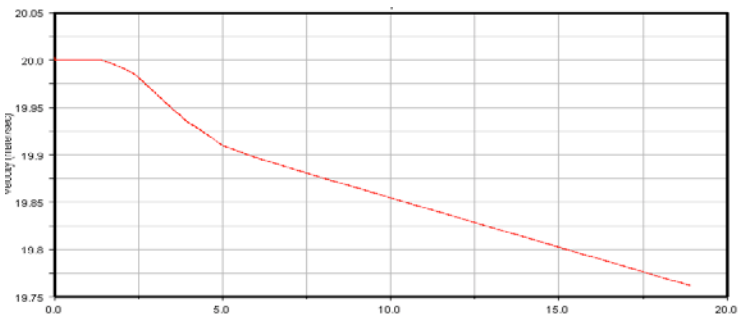
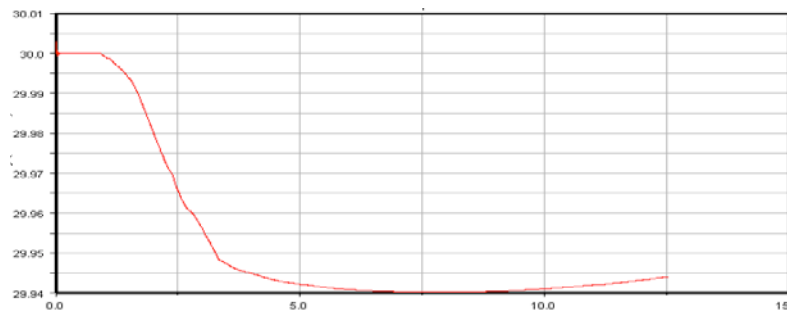
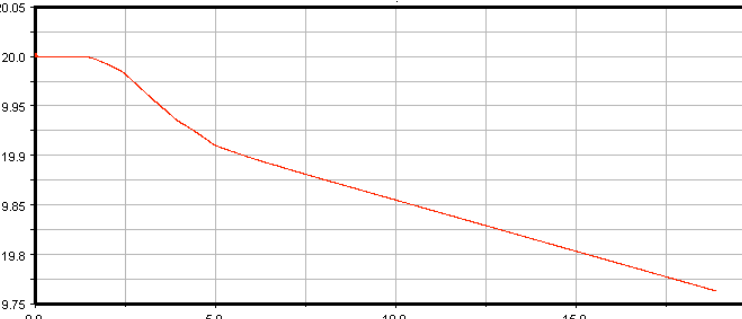
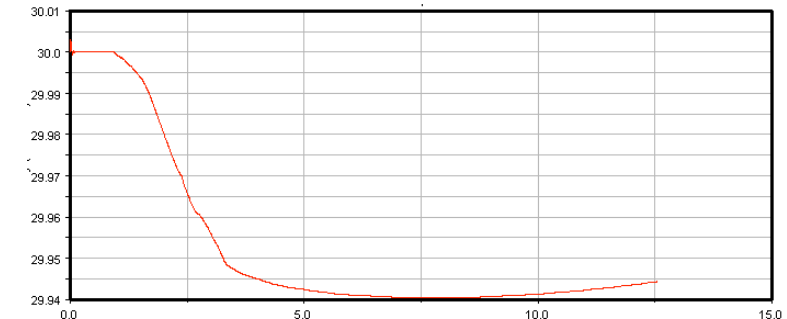
## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Se puede apreciar que si aumentamos la velocidad, conseguimos que la pérdida de velocidad debido al rozamiento entre las pestañas y el raíl sea menor, ya que el contacto entre ambos será menos constante debido a que el movimiento de lazo que se genera tiene una menor frecuencia reduciendo el contacto constante. Nos damos cuenta que según la pendiente de la conicidad va disminuyendo, las pérdidas de velocidad a 20 m/s van mejorando, es decir, la pérdida es menor. Sin embargo a 30 m/s se obtienen resultados más desfavorables. Aún así, la pérdida a 30 m/s es menor que a 20 m/s.

Tabla 50: Velocidades longitudinales en tramo curvo de las conicidades 1/10 ; 1/20.

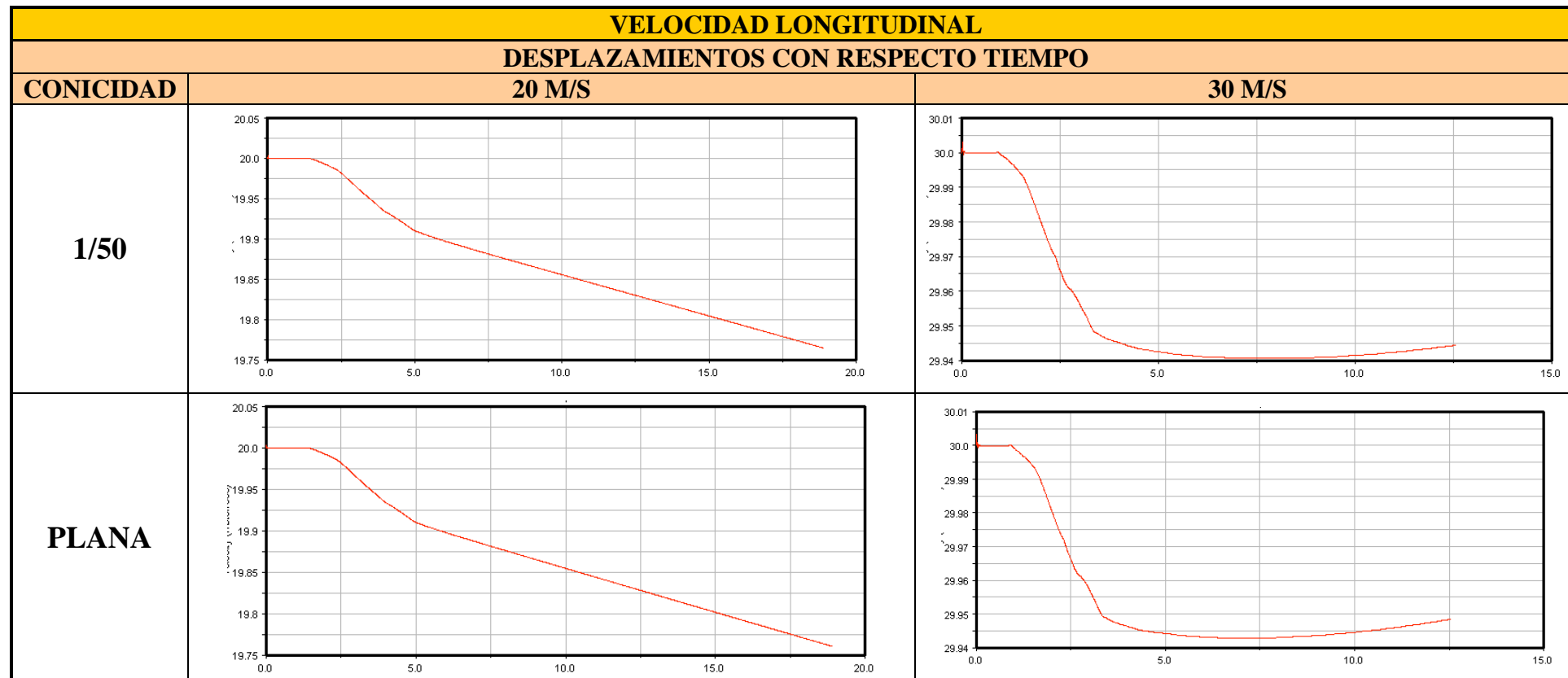
VELOCIDAD LONGITUDINAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO TIEMPO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 51: Velocidades longitudinales en tramo curvo de las conicidades 1/30 ; 1/40.*

VELOCIDAD LONGITUDINAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO TIEMPO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/30		
1/40		



*Tabla 52: Velocidades longitudinales en tramo curvo de las conicidades 1/50 ; plana.*



## **DESPLAZAMIENTOS**

### **III. DESPLAZAMIENTO LATERAL**

Las gráficas de desplazamiento lateral se representan en las *tablas 53, 54 y 55*. El eje de ordenadas representa el desplazamiento lateral Y en metros de la rueda izquierda del eje frontal del bogie delantero.

#### **❖ Conicidad 1/10**

En ambas velocidades se observa un desplazamiento positivo en dirección del eje Y esto es debido a la fuerza centrífuga que ejerce sobre el vehículo un desplazamiento hacia fuera de la curva. Se puede observar que el desplazamiento se mantiene constante en 0,0034 metros. Si aumentamos la velocidad se obtiene que el desplazamiento que se produce es 0,0001 metros superior a 20 m/s y después desciende a 0,0034 donde se estabiliza.

#### **❖ Conicidad 1/20**

Con esta conicidad sucede lo mismo que con la anterior, se produce un desplazamiento positivo en el momento que el vehículo toma la curva de valor 0,0034 metros. Si aumentamos la velocidad, la rueda sufre un desplazamiento superior de 0,0035 metros y después desciende hasta el valor de 0,0034 metros.

#### **❖ Conicidad 1/30**

Se obtiene un desplazamiento positivo de 0,0034 metros mientras que si aumentamos la velocidad obtenemos un desplazamiento máximo positivo de 0,0035 metros y va estabilizándose hasta llegar a 0,0034 metros. Se observa que la pendiente de estabilización va siendo cada vez más homogénea a la curva obtenida con una velocidad de 20 m/s.

#### **❖ Conicidad 1/40**

Se puede observar que las gráficas cada vez son más semejantes, el desplazamiento sigue siendo el mismo de 0,0034 metros pero el máximo a 30 m/s sigue siendo superior en 0,0001 metros.

#### **❖ Conicidad 1/50**

Se obtiene un desplazamiento máximo de 0,0035 a 20 m/s, igual que en las demás conicidades, y se estabiliza a 0,0034 metros. Si aumentamos la velocidad el desplazamiento pasa a ser de 0,0036 y se estabiliza en 0,0034.

#### **❖ Conicidad rueda plana.**

Se obtienen resultados similares a las anteriores conicidades. Estabilización con un desplazamiento de 0,0034 metros. Máximo desplazamiento de 0,0035 metros a 20 m/s y de 0,0036 metros a 30 m/s.

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Concluimos que a medida que disminuimos la conicidad, las gráficas obtenidas, es decir, el comportamiento del vehículo respecto al desplazamiento lateral, van siendo semejante en ambas velocidades, es decir no nos influye tanto la velocidad como en conicidades elevadas. También observamos que el desplazamiento inicial (considerado hasta donde se produce el cambio de signo del desplazamiento, momento el cual el vehículo entra en la curva) sufre un cambio de una posición de equilibrio, permanece estable en  $-0,0031$ , a un aumento del desplazamiento hasta un valor de  $-0,0037$ . Se aprecia que con conicidad plana este desplazamiento inicial es prácticamente estable en un valor de  $-0,0031$  metros.

Tabla 53: Desplazamientos laterales en tramo curvo de las conicidades 1/10 ; 1/20.

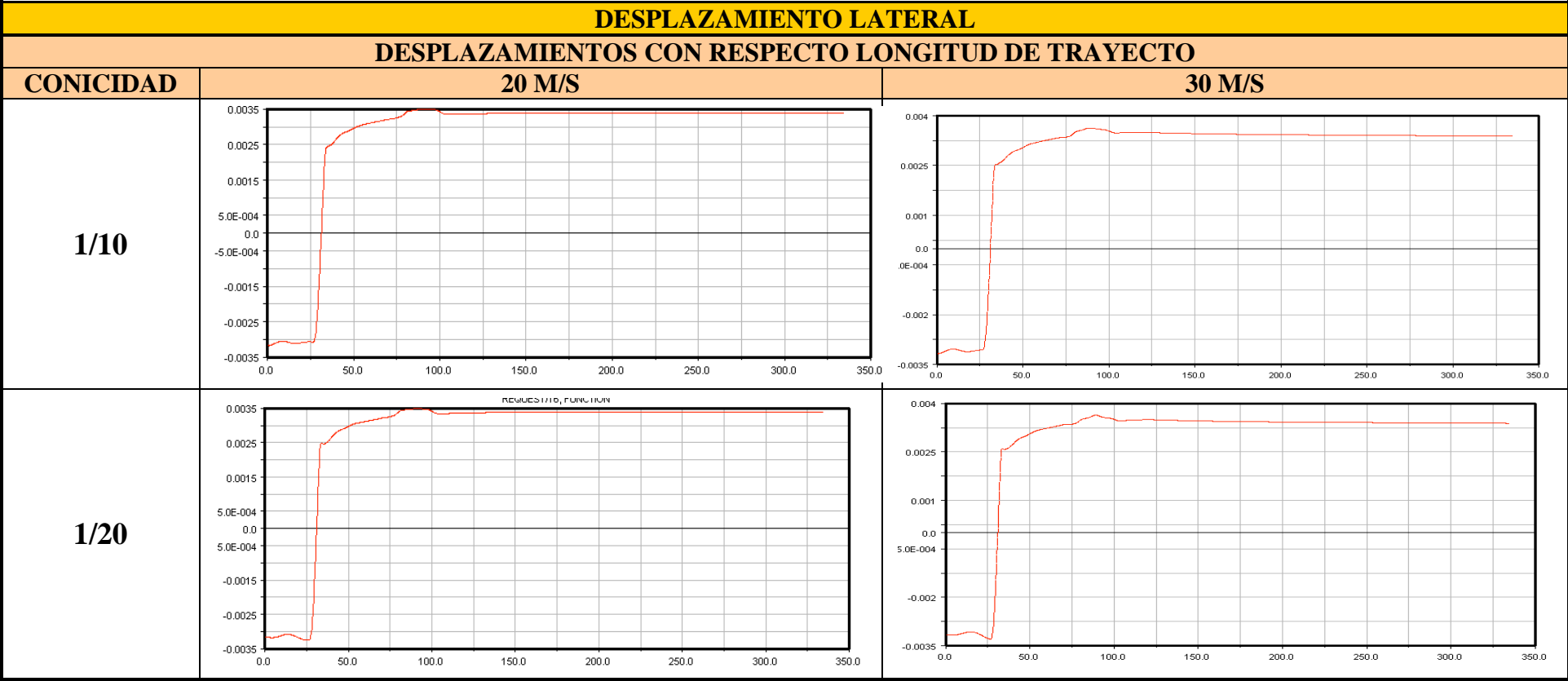
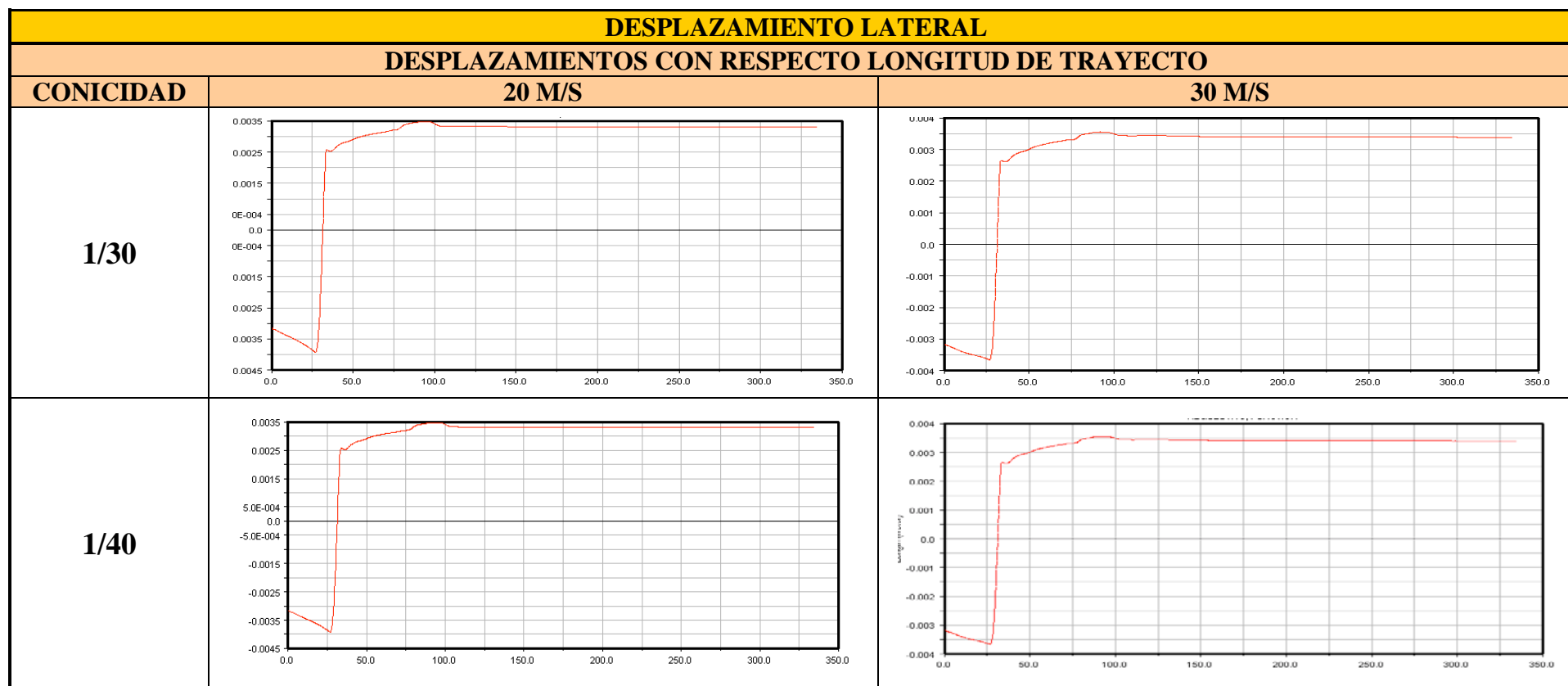
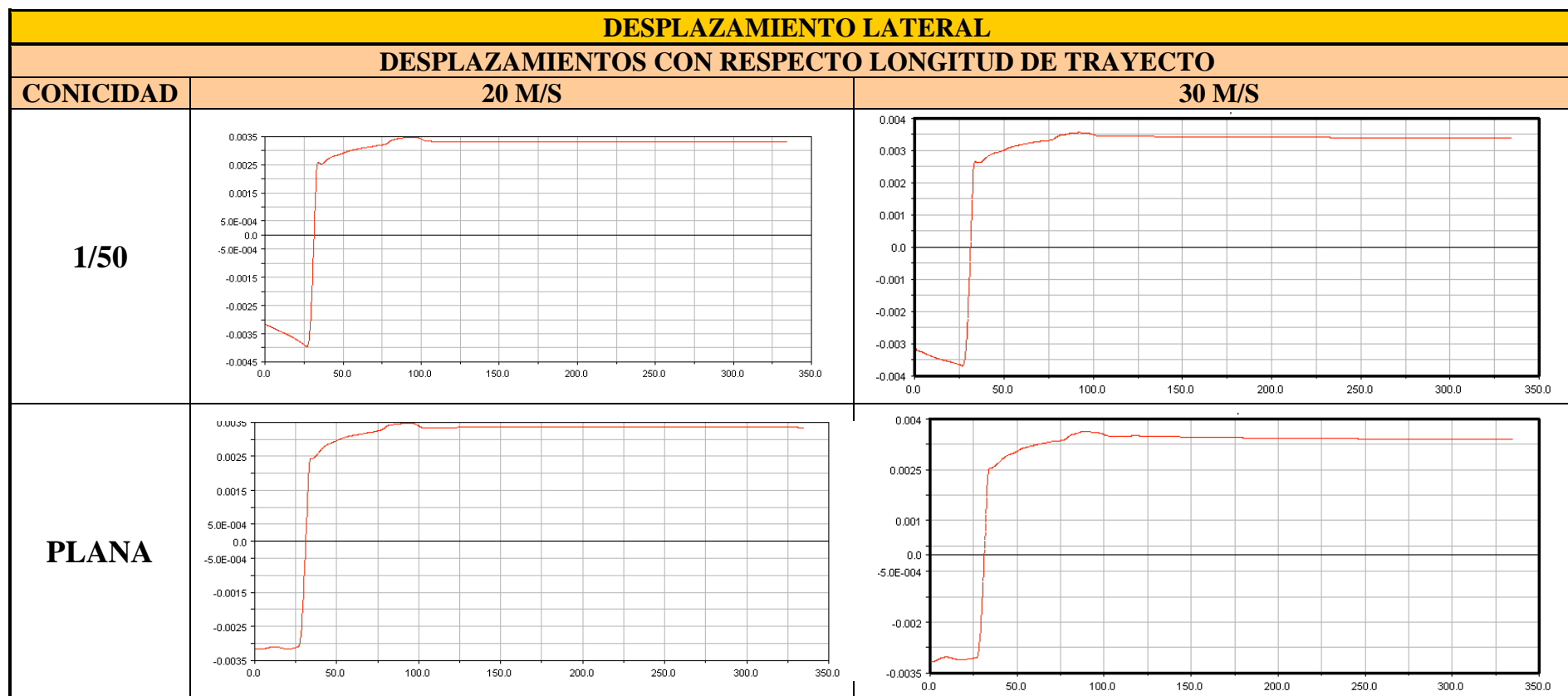


Tabla 54: Desplazamientos laterales en tramo curvo de las conicidades 1/30 ; 1/40.



*Tabla 55: Desplazamientos laterales en tramo curvo de las conicidades 1/50 ; plana.*



#### IV. DESPLAZAMIENTO VERTICAL

Como en el caso de vía de tramo recto, las gráficas de desplazamiento vertical se representan en las *tablas* 56, 57 y 58. El eje de ordenadas representa el desplazamiento vertical  $Z$ , en metros, de la rueda derecha del eje frontal del bogie delantero. Hay que tener en cuenta que se mantiene en torno a 0,473 m que es el radio de la rueda para todas las conicidades, ya que se toma como origen de coordenadas el punto de contacto de la rueda con el raíl.

##### ❖ Conicidad 1/10

En las siguientes gráficas se puede observar como comienza con un valor próximo a 0,473 metros que es el radio nominal de la rueda y posteriormente se produce un desplazamiento vertical positivo hasta un valor de 0,4784 metros hasta llegar a los 100 metros según el eje  $X$  don se estabiliza en una altura de 0,4776 metros. Si aumentamos la velocidad a 30 m/s se observa un aumento del valor máximo alcanzado, en este caso de 0,4793 metros, se produce también un descenso del desplazamiento vertical de la rueda hasta el final de la simulación, con un valor al final de la misma de 0,4776 metros.

##### ❖ Conicidad 1/20

Se alcanza un máximo valor de 0,4782 metros y posteriormente se estabiliza la rueda con un desplazamiento vertical de 0,4775 metros. Si aumentamos la velocidad a 30 m/s, observamos un valor máximo de 0,4793 metros y posteriormente un descenso del desplazamiento vertical hasta alcanzar al final de la simulación un valor de 0,4775 metros.

##### ❖ Conicidad 1/30

A 20 m/s se consigue un valor máximo de 0,4781 metros y se estabiliza pasados los 100 metros a 0,4770 metros. Si aumentamos la velocidad obtenemos que el valor máximo obtenido es de 0,4786 metros y al igual que en los casos anteriores se produce un descenso del desplazamiento vertical hasta alcanzar el valor final de 0,4774 metros cuando finaliza la simulación.

##### ❖ Conicidad 1/40

Obtenemos un valor máximo de 0,4780 metros. Se estabiliza en la curva con un valor del desplazamiento vertical de 0,4770 metros. Si cambiamos la velocidad a 30 m/s, obtenemos que el máximo es de 0,4785 metros y va disminuyendo hasta alcanzar los 0,4773 metros al finalizar la simulación.

##### ❖ Conicidad 1/50

Con esta conicidad a 20 m/s obtenemos un valor máximo de 0,4779 metros y desciende hasta estabilizarse en un valor de 0,4769 metros. Aumentando la velocidad

conseguimos un valor máximo de 0,4784 metros y un valor al final de la simulación de 0,4773 metros

#### ❖ **Conicidad rueda plana.**

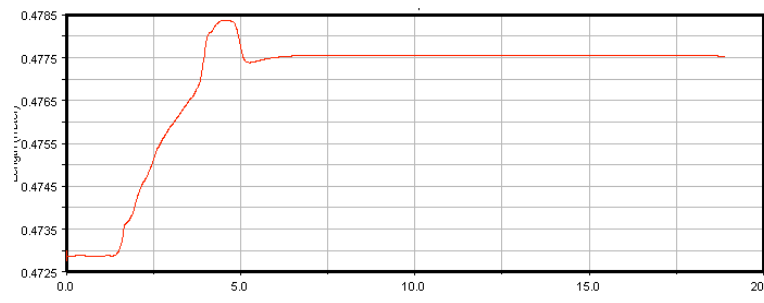
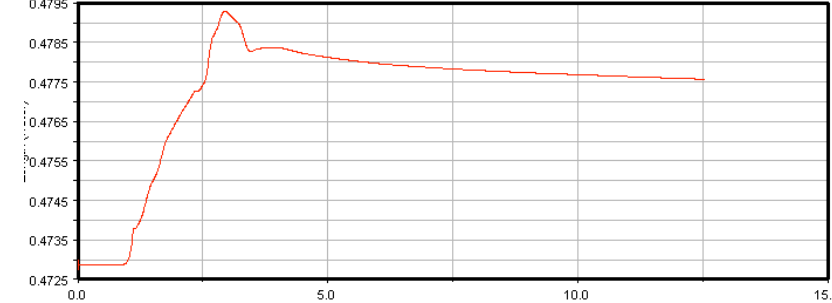
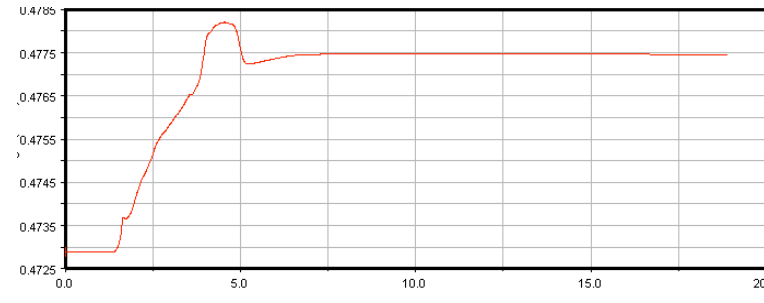
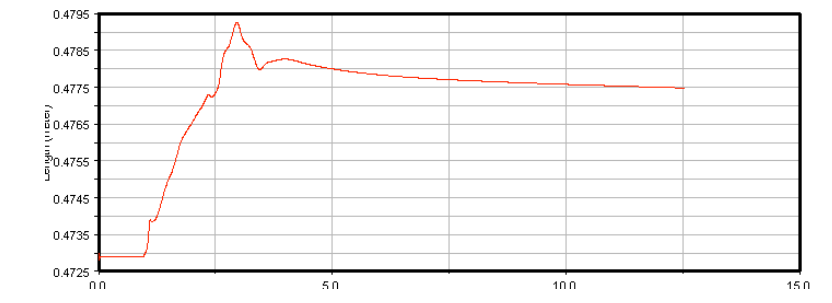
Por último con esta conicidad obtenemos un valor máximo de 0,4777 metros y desciende hasta que alcanza un valor de 0,477 metros. Aumentado la velocidad a 30 m/s, obtenemos que el valor máximo es 0,4793 metros y valor que se alcanza al final de la simulación es 0,4776 metros.

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

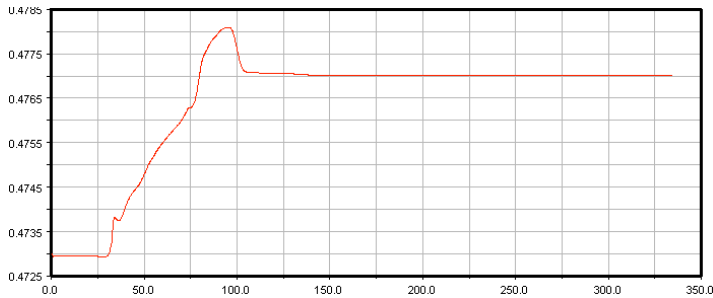
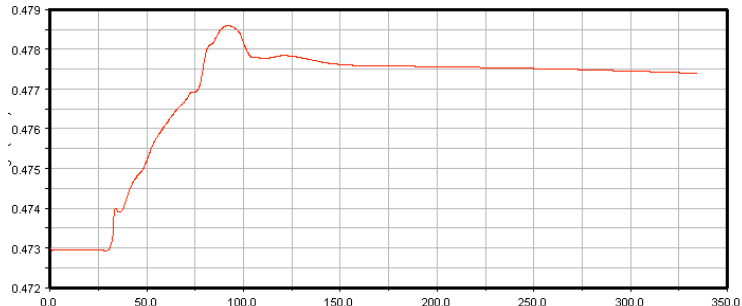
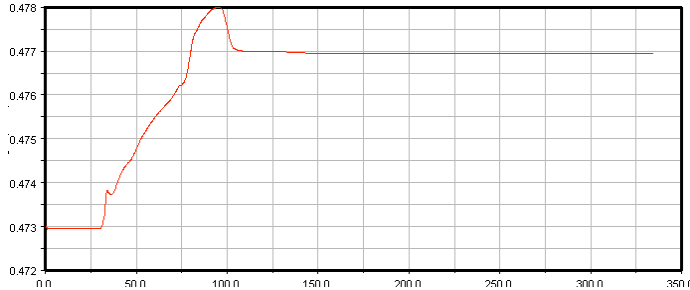
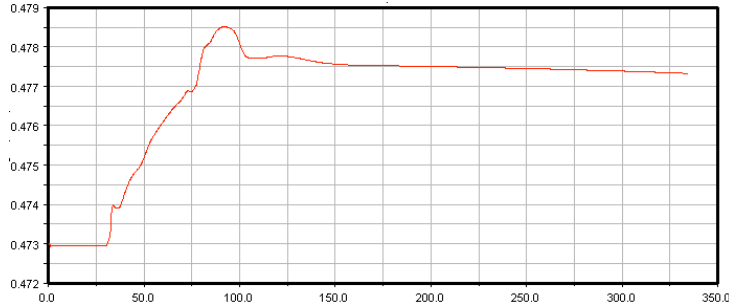
Como se puede observar en todas las gráficas se produce un incremento brusco en el desplazamiento vertical de la rueda debido a la entrada en la curva, provocando que la rueda se desplace a través de su conicidad y de en algunos casos subiéndose un poco en la pestaña, lo que provoca que el radio considerado sea mayor como se puede observar en las gráficas. Una vez se pasa los 110 metros respecto del eje X, unos 115 metros de vía, se empieza a estabilizar gracias al movimiento de lazo y el desplazamiento vertical se hace más constante. Si aumentamos la velocidad, la entrada en curva se hace más brusca lo que genera que el desplazamiento vertical sea mayor. Se observa que si la conicidad es menor, el desplazamiento vertical obtenido también es menor, esto se debe a que al ser menor la inclinación del perfil de la rueda y radio máximo que puede llegar a tener la rueda (siendo éste considerado al final de la conicidad) es menor y por consiguiente la rueda se podrá desplazar menos verticalmente.



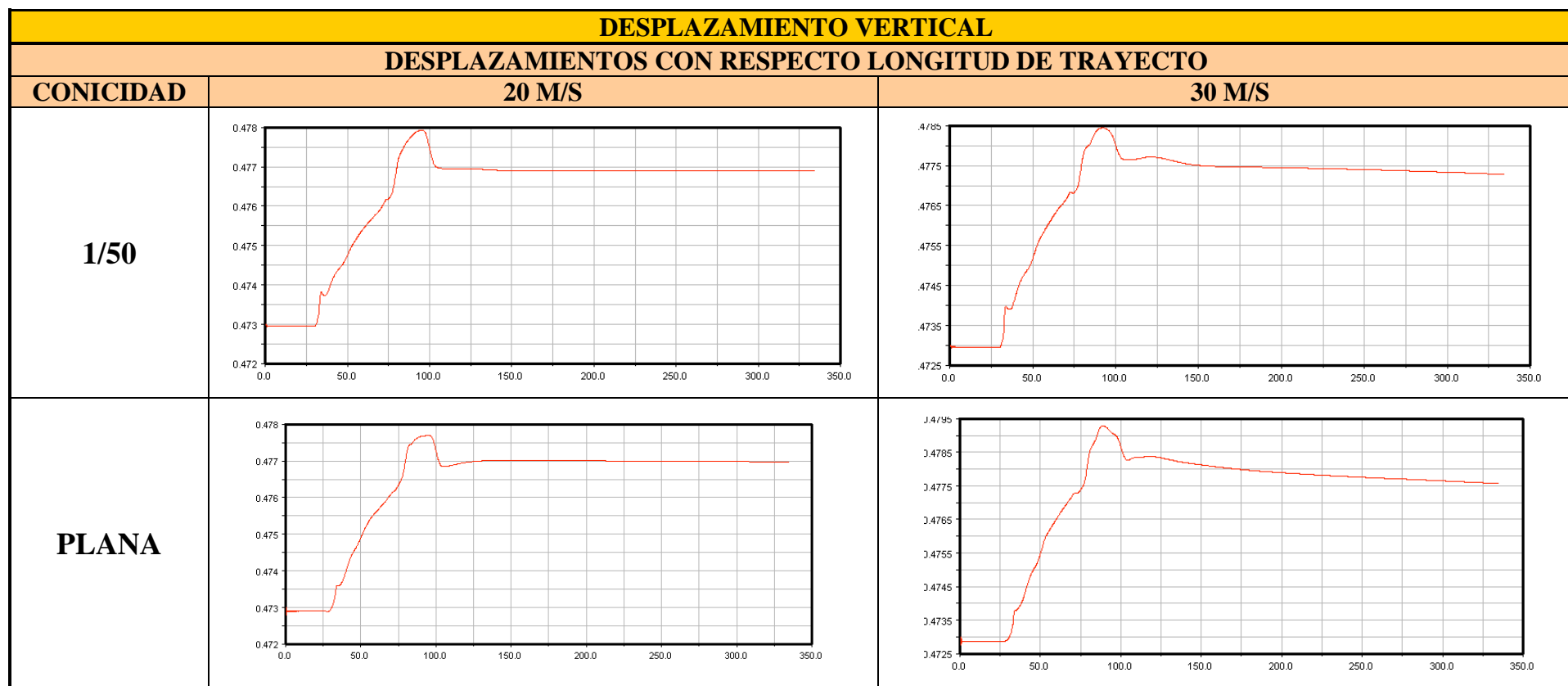
Tabla 56: Desplazamientos verticales en tramo curvo de las conicidades 1/10 ; 1/20.

DESPLAZAMIENTO VERTICAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 57: Desplazamientos verticales en tramo curvo s de las conicidades 1/30 ; 1/40.*

DESPLAZAMIENTO VERTICAL		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/30		
1/40		

*Tabla 58: Desplazamientos verticales en tramo curvo s de las conicidades 1/50 ; plana.*



## **FUERZAS**

### **IV. FUERZA FX**

Las gráficas de la representación de la fuerza en dirección X durante el trayecto de tramo recto del vehículo ferroviario Avant serie S-104, se representan en las *tablas 59, 60 y 61*. El eje de ordenadas representa la fuerza en dirección X que es la dirección que sigue el tren.

#### **❖ Conicidad 1/10**

Cuando circula a 20 m/s, se observa un valor máximo de 28.862 N cuando entra en curva y posteriormente se estabiliza en un valor de 23.224 N. Si aumentamos la velocidad a 30 m/s, el valor máximo alcanzado es de 24.288 N y desciende hasta obtener un valor al final de la simulación de 7.123 N.

#### **❖ Conicidad 1/20**

A 20 m/s se obtiene que el valor máximo es de 28.862 N y desciende hasta estabilizarse en 23.458 N. Aumentando la velocidad, el valor máximo obtenido es de 24.713 N y desciende hasta el valor de 7.331 N.

#### **❖ Conicidad 1/30**

El máximo obtenido a 20 m/s es de 28.551 N y se estabiliza en un valor de 22.667 N. A 30 m/s obtenemos que el máximo obtenido en la entrada de la curva es de 24.722 N y desciende hasta alcanzar 7.481 N.

#### **❖ Conicidad 1/40**

Valor máximo de 28.492 N y después se estabiliza en 22.621 N. Aumentando la velocidad a 30 m/s, obtenemos un máximo en la entrada en curva de 24.660 N y desciende hasta alcanzar al final de la simulación el valor de 7.541 N.

#### **❖ Conicidad 1/50**

A 20 m/s, se obtiene un valor máximo de 29.005 N a 97 metros del comienzo del trayecto, después se estabiliza con un valor de 22.813 N. A 30 m/s, valor máximo de 24.963 N y un valor mínimo al final de la simulación de 7.020 N.

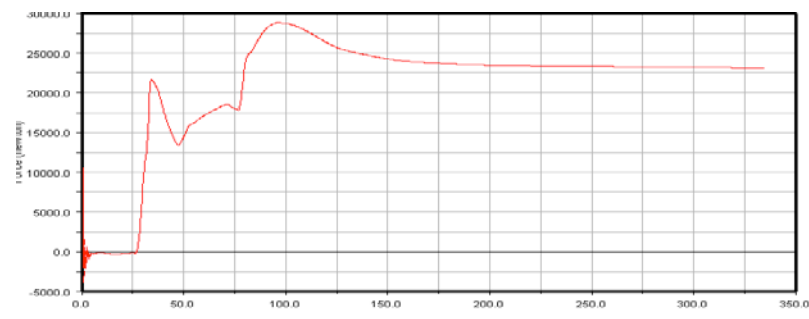
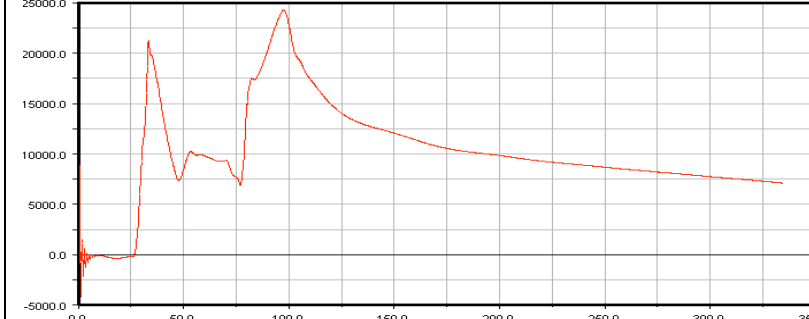
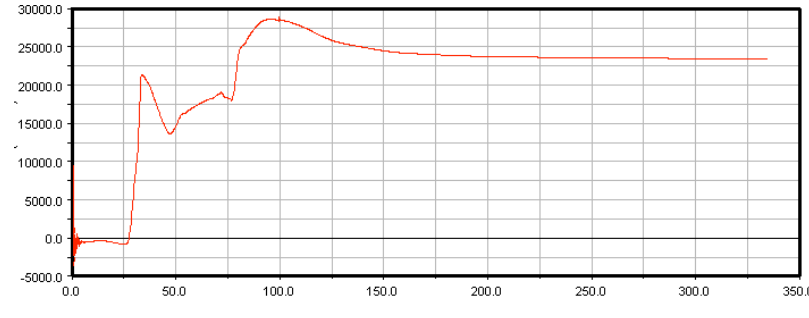
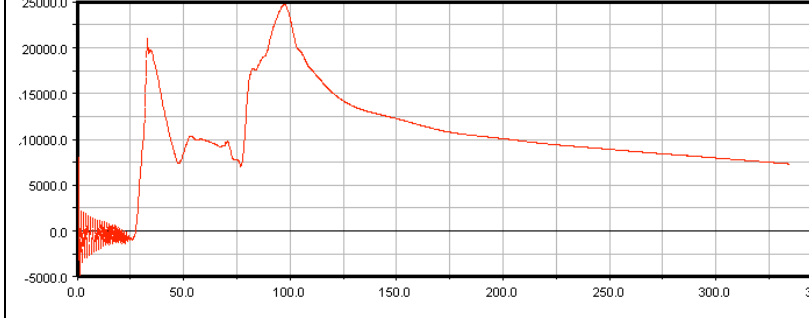
#### **❖ Conicidad rueda plana.**

Valor máximo de 28.683 N y estabilización a 200 metros respecto del eje X con valor de 23.069 N. Aumentando la velocidad a 30 m/s, conseguimos un valor máximo de 24.641 N, y desciende hasta el final de la simulación con un valor de 6.618 N.

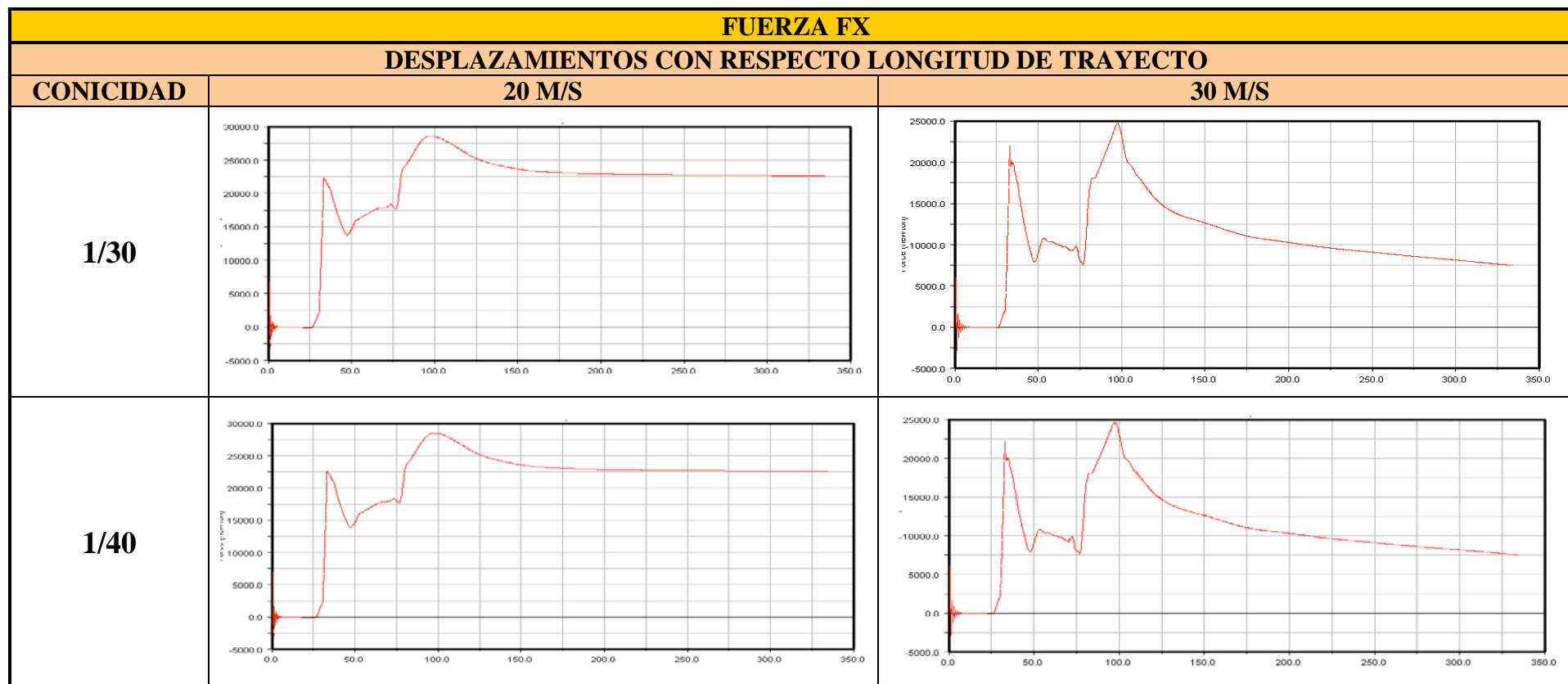
## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Como podemos observar, al entrar en curva se produce un aumento brusco de la fuerza en dirección X, la cual gracias al movimiento de lazo consigue estabilizarse hasta obtener un valor estable. Se observa que si se aumenta la velocidad esta fuerza obtenida es menor, esto es debido a que al entrar en curva a mayor velocidad, el contacto entre la pestaña y el raíl es mayor provocando, un rozamiento mayor, lo que genera pérdidas en dirección de avance del vehículo. También debido a este contacto hay un reparto de las fuerzas generando que la fuerza en dirección x disminuya y aumentando como se verá en dirección Y, y en dirección Z. Se observa que si disminuimos la conicidad se obtiene valores menores

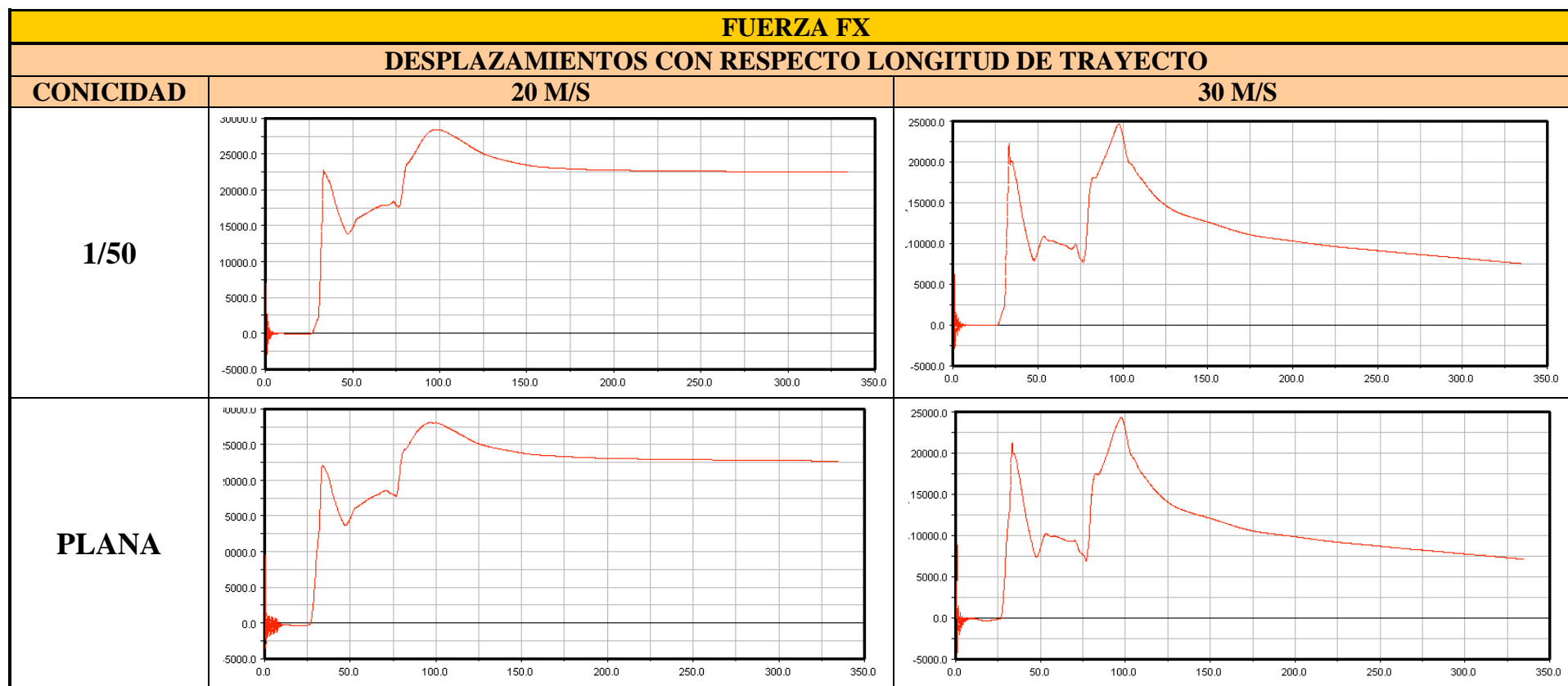
Tabla 59: Fuerzas Fx en tramo curvo de las conicidades 1/10 ; 1/20.

FUERZA FX		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 60: fuerzas  $F_x$  en tramo curvo de las conicidades 1/30 ; 1/40.*



*Tabla 61: Fuerzas Fx en tramo curvo de las conicidades 1/50 ; plana.*





## V. FUERZA FY

Las gráficas de la fuerza  $F_y$  se representan en las *tablas 62, 63 y 64*. El eje de ordenadas representa la fuerza en dirección Y que es la dirección lateral.

### ❖ Conicidad 1/10

Se obtiene un mínimo de -50.780 N en la entrada en la curva. Posteriormente se estabiliza en un valor de -46.522 N. Aumentando la velocidad a 30 m/s, conseguimos un mínimo de -72.196 N y va disminuyendo hasta obtener un valor final de -61.267 N.

### ❖ Conicidad 1/20

Con esta conicidad obtenemos un mínimo de -50.062 N y un valor estable a partir de 170 metros respecto del eje x de -46.552 N. A 30 m/s este valor mínimo se incrementa hasta el valor de -73.192 N y va disminuyendo hasta alcanzar el valor -60.657 N al final de la simulación.

### ❖ Conicidad 1/30

Valor mínimo de -49.135 N y valor estable de -41.319 N. Aumentando esta velocidad a 30 m/s los resultados nos muestran que alcanza un mínimo de -65.121 N y un valor al final de la simulación de -60.348 N.

### ❖ Conicidad 1/40

Con esta conicidad obtenemos un valor mínimo a la entrada de la curva de -48.882 N. A 30 m/s, conseguimos un mínimo de -65.219 N y valor al final de la simulación de -60.473 N.

### ❖ Conicidad 1/50

Al igual que en el resto de conicidades, se obtiene a 93 metros respecto del eje X un mínimo pero en este caso de valor -48.659 N y se estabiliza en -41.012 N. Una vez aumentamos la velocidad, nos da como resultado un valor mínimo de -65.080 N y disminuye a lo largo del resto de la simulación hasta un valor de -60.136 N.

### ❖ Conicidad rueda plana.

Se observa un mínimo de valor -47.964 N que posteriormente va disminuyendo hasta el valor de -43.805 N. Cuando aumentamos la velocidad a 30 m/s, obtenemos al igual que en las demás conicidades un aumento del valor de la fuerza, en este caso el mínimo es de valor -72.168 N y va disminuyendo este valor hasta -61.204 N.

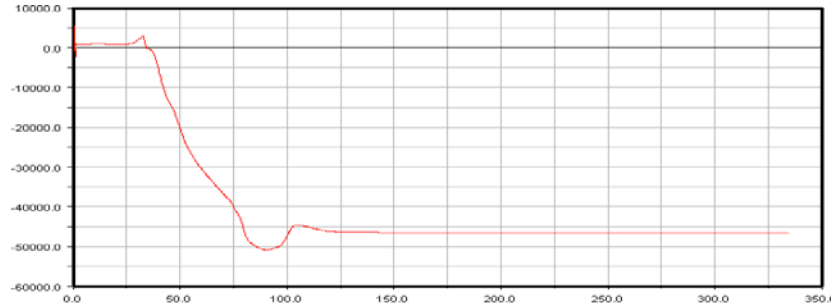
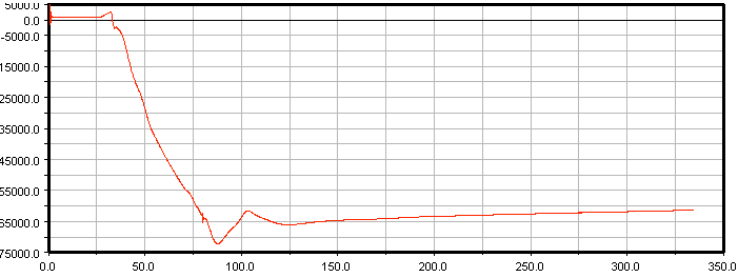
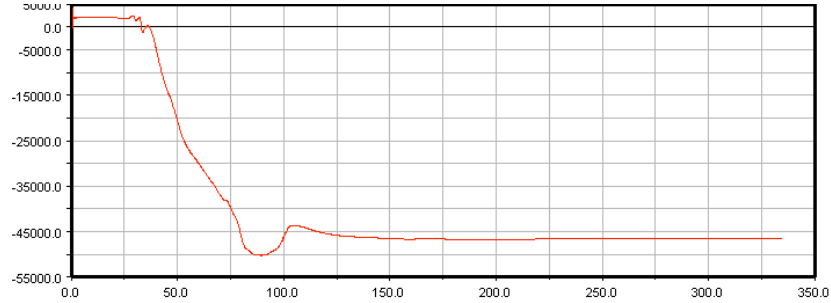
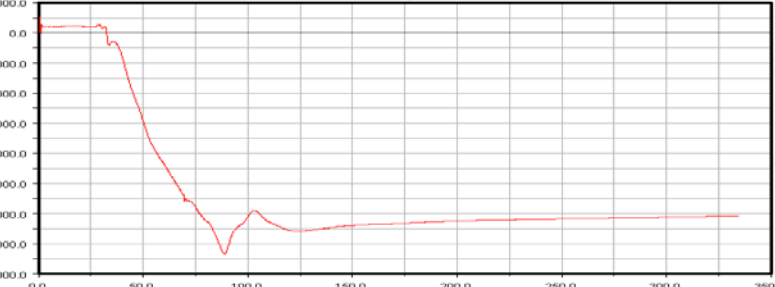
## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que la fuerza en dirección Y aumente si aumentamos la velocidad del vehículo, esto ocurre porque, al desplazarse el eje hacia fuera de la curva, por la acción de la fuerza centrífuga, la rueda izquierda llega a

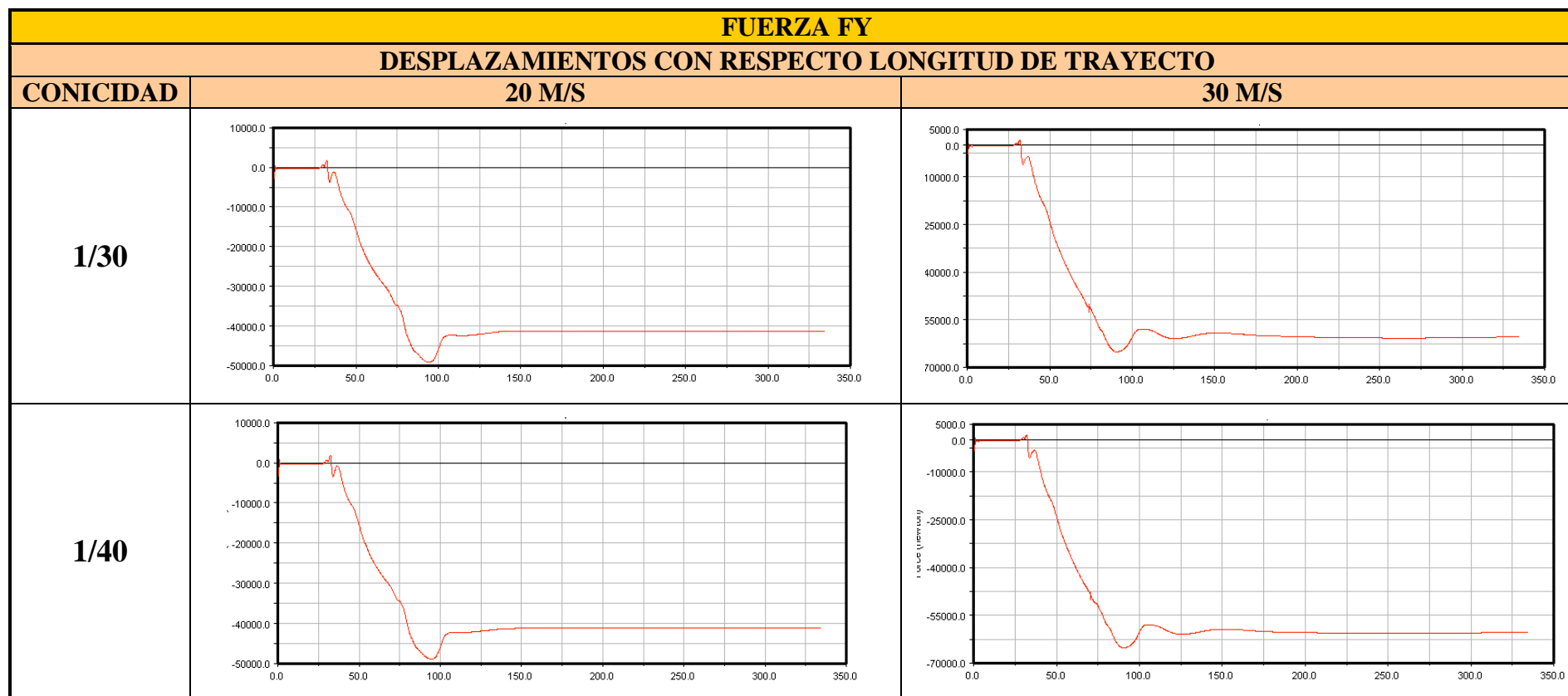
alcanzar dos puntos de contacto en el raíl izquierdo (que es el exterior de la vía de la curva), produciéndose una nueva redistribución de las fuerzas de contacto (se pasa de 2 a 3 puntos de contacto) que hace que se llegue a un nuevo equilibrio.

Como ocurre en el caso anterior cuando disminuimos la conicidad los resultados obtenidos son más favorables, ya que se obtienen valores absolutos menores.

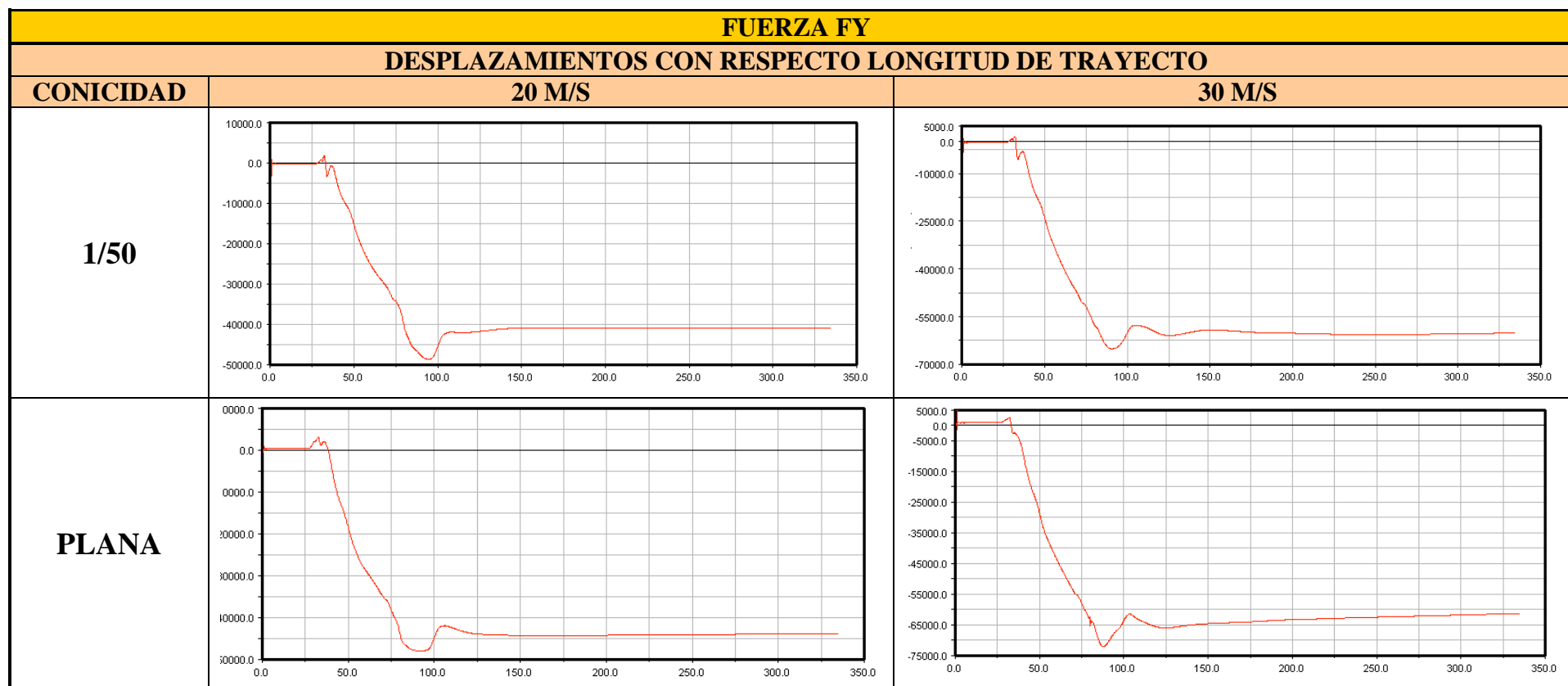
Tabla 62: Fuerzas  $F_y$  en tramo curvo de las conicidades 1/10 ; 1/20.

FUERZA FY		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDA D	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 63: Fuerzas  $F_y$  en tramo curvo de las conicidades 1/30 ; 1/40.*



**Tabla 64: Fuerzas Fy en tramo curvo de las conicidades 1/50 ; plana.**



## VI. FUERZA FZ

Al igual que hemos comentado en el caso anterior, las gráficas de la fuerza Fz se representan en la *tablas 65, 66 y 67*. El eje de ordenadas representa la fuerza en dirección Z que es la dirección vertical.

La masa que se ha considerado para el vehículo ferroviario es:

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ vagón de } 63.000 \text{ kg} \\ 2 \text{ bogies de } 8920 \text{ kg} \end{array} \right\} = 80.840 \text{ kg}$$

*Ecuación*

34

Al repartirse la carga en dos bogies, es decir 8 ruedas queda  $10.105 \text{ kg} \rightarrow 99.130 \text{ N}$  por rueda aproximadamente.

### ❖ Conicidad 1/10

Se observa un máximo de valor  $1,465 \cdot 10^5 \text{ N}$  a una distancia de 50 metros, y posteriormente se estabiliza con un valor de  $1,12 \cdot 10^5 \text{ N}$ . Si aumentamos la velocidad a  $30 \text{ m/s}$ , el pico máximo se obtiene a una distancia de 75 metros y de valor  $1,79 \cdot 10^5 \text{ N}$ , posteriormente se produce un período de estabilización hasta alcanzar el valor de  $1,71 \cdot 10^5 \text{ N}$  al final de la simulación.

### ❖ Conicidad 1/20

Se observa un pico de valor  $1,4652 \cdot 10^5 \text{ N}$  a una distancia de 47 metros llegando al equilibrio con un valor de  $1,12 \cdot 10^5 \text{ N}$ . A  $30 \text{ m/s}$  el pico se obtiene a una distancia de 76 metros y es de valor  $1,70 \cdot 10^5 \text{ N}$ . Al final de la simulación se obtiene un valor de  $1,713 \cdot 10^5 \text{ N}$ .

### ❖ Conicidad 1/30

Aquí obtenemos el pico a 47 metros del origen y de valor  $1,45 \cdot 10^5 \text{ N}$ . Y el equilibrio se obtiene con un valor de  $1,11 \cdot 10^5 \text{ N}$ . Aumentando la velocidad hasta  $30 \text{ m/s}$ , obtenemos un pico de valor  $1,689 \cdot 10^5 \text{ N}$  a una distancia de 76 metros. Al final de la simulación el valor obtenido es de  $1,712 \cdot 10^5 \text{ N}$ .

### ❖ Conicidad 1/40

Con esta conicidad el pico obtenido a 47 metros es de  $1,45 \cdot 10^5 \text{ N}$ . Alcanzará el equilibrio con una Fz de  $1,10 \cdot 10^5 \text{ N}$ . Si aumentamos la velocidad los datos obtenidos son, valor al final de la simulación de  $1,709 \cdot 10^5 \text{ N}$ . También se observa un pico de valor  $1,68 \cdot 10^5 \text{ N}$  a una distancia de 76,4 metros.

### ❖ Conicidad 1/50

En esta simulación obtenemos que a 47 metros del inicio se produce un máximo de  $1,45 \cdot 10^5 \text{ N}$  y se obtiene el equilibrio con una Fz de  $1,109 \cdot 10^5 \text{ N}$ . Realizando el mismo

análisis pero a 30 m/s, el valor del pico, en este caso, se encuentra a 76,3 metros y es de valor  $1,687 \cdot 10^5$  N, después de la entrada en curva aumenta hasta un valor de  $1,70 \cdot 10^5$  N al final de la simulación.

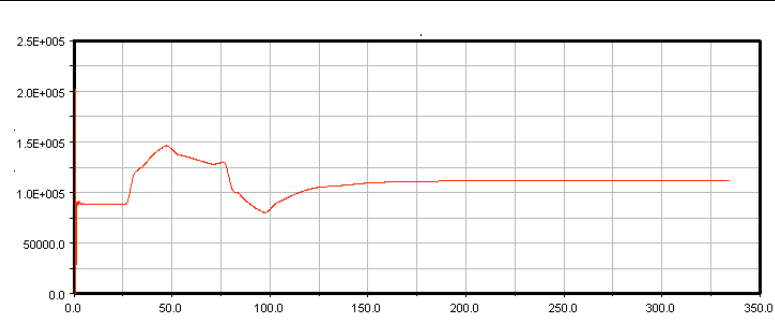
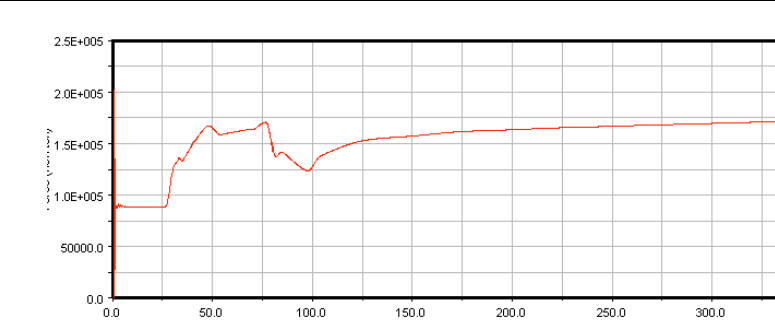
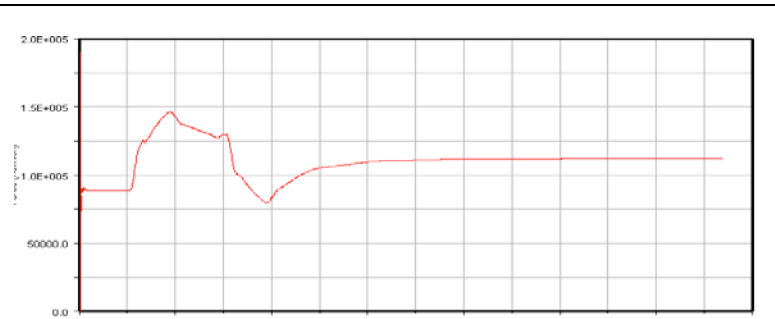
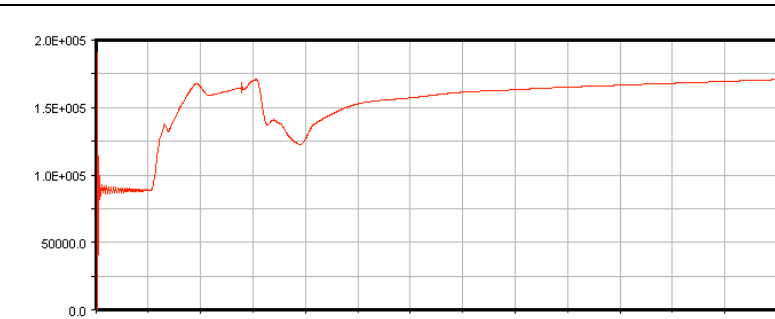
#### ❖ Conicidad rueda plana.

A 20 m/s el a 47,2 metros, al igual que en los casos anteriores se obtiene un pico de valor  $1,46 \cdot 10^5$  N después de la entrada en curva se equilibra en un valor de  $1,12 \cdot 10^5$  N. Aumentando la velocidad del vehículo hasta los 30 m/s, se obtiene un pico de valor  $1,709 \cdot 10^5$  N a una distancia de 76,4 metros. Y mientras está en la curva aumenta el valor hasta el final de la simulación donde alcanza el valor de  $1,71 \cdot 10^5$  N.

### ANÁLISIS DE RESULTDOS

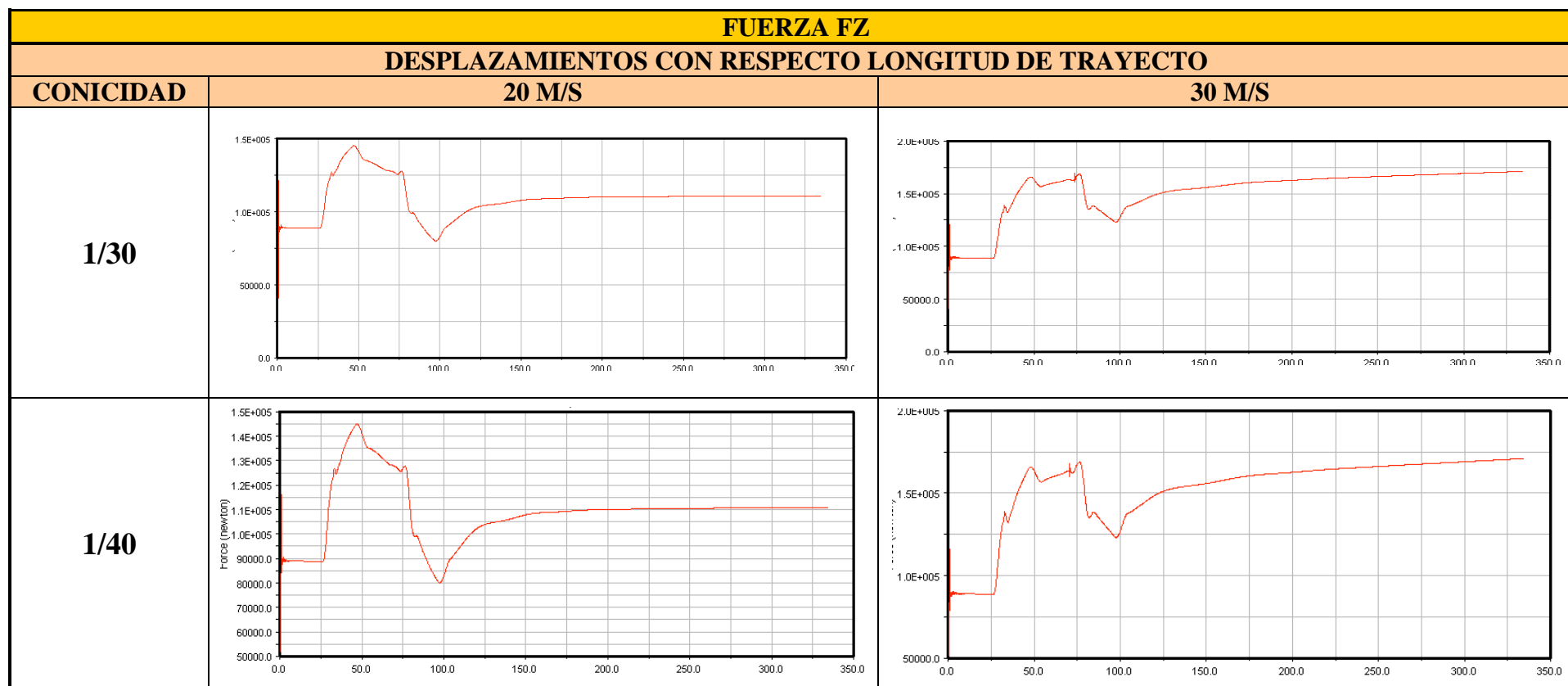
Se puede determinar que el cambio de conicidad no afecta significativamente a este valor, ya que obtenemos valores muy similares. Sin embargo al aumentar la velocidad la  $F_z$  aumenta, al igual que en los casos de las fuerzas  $F_x$ ,  $F_y$ , la acción de la fuerza centrífuga dará lugar a una nueva redistribución de las fuerzas, que provoca que se llegue a un nuevo equilibrio.

Tabla 65: Fuerzas Fz en tramo curvo de las conicidades 1/10 ; 1/20.

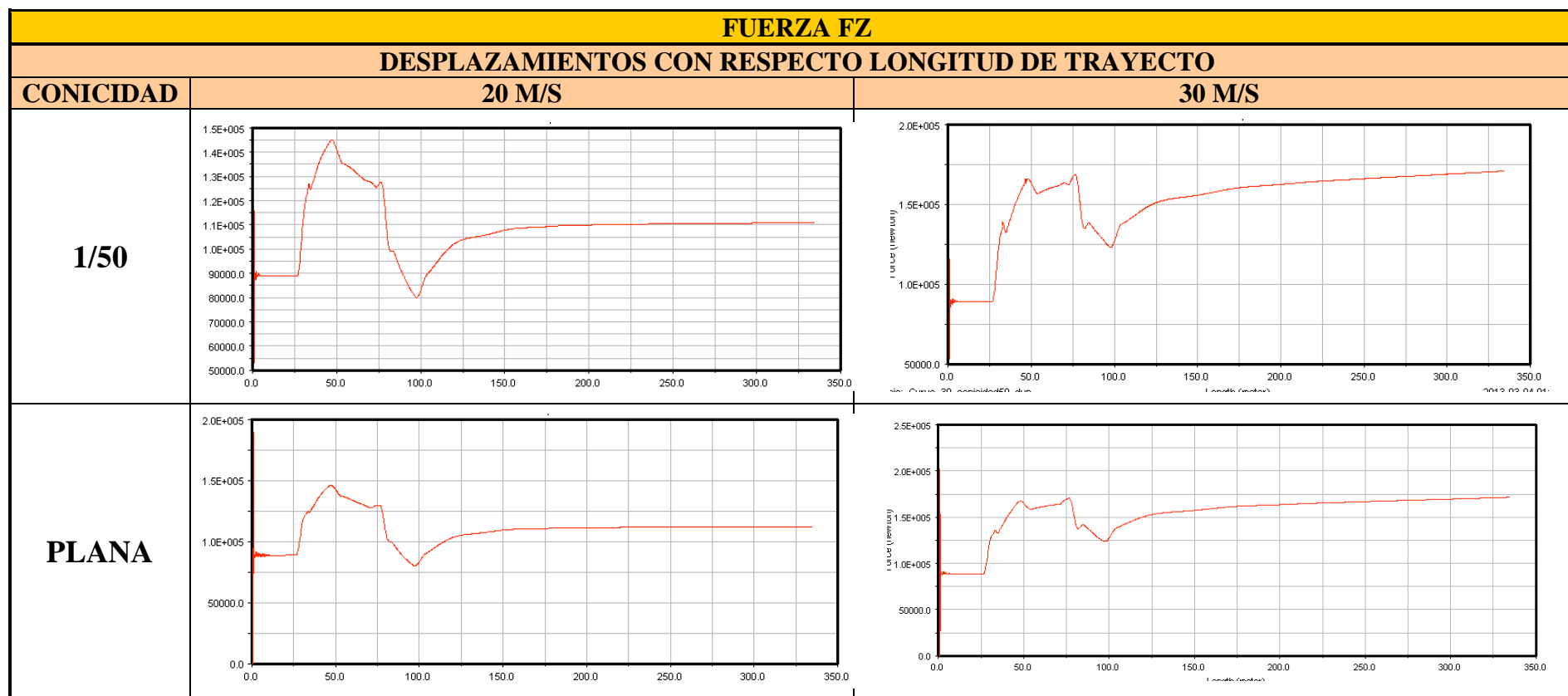
FUERZA FZ		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		



*Tabla 66: Fuerzas  $F_z$  en tramo curvo de las conicidades 1/30 ; 1/40.*



*Tabla 67: Fuerzas  $F_z$  en tramo curvo de las conicidades 1/50 ; plana.*



## **MOMENTOS**

### **IV. MOMENTO MX**

Las gráficas del momento Tx se representan en las *tablas* 68, 69 y 70. El eje de ordenadas representa el momento en dirección X que es la dirección que sigue el tren.

#### **❖ Conicidad 1/10**

Al realizar la simulación a 20 m/s, obtenemos un valor mínimo de -27.709 Nm, una vez que entra en curva se estabiliza en un valor de -26.267 Nm. A 30 m/s los resultados nos indican un mínimo de valor -40.000 Nm y disminuye hasta un valor final al acabar la simulación de -35.439 Nm.

#### **❖ Conicidad 1/20**

Con esta conicidad obtenemos un valor mínimo a -27.484 Nm a 86 metros del inicio. Se estabiliza en un valor de -26.230 Nm. Aumentando la velocidad a 30 m/s nos da como resultado un mínimo de valor -40.474 Nm y desciende a lo largo de la curva hasta un valor final de -35.167 Nm.

#### **❖ Conicidad 1/30**

Aquí se obtiene un mínimo de valor -26.667 Nm y se estabiliza en un valor de -23.651 Nm. Si realizamos el análisis a una velocidad de 30 m/s se obtiene un valor mínimo de -36.209 Nm y posteriormente se estabiliza en -35.041 Nm.

#### **❖ Conicidad 1/40**

Con esta conicidad los resultados obtenidos son un valor mínimo -26.657 Nm y se alcanza el equilibrio con un valor de -23.585 Nm, mientras que si la velocidad del vehículo es de 30 m/s el mínimo de valor -36.276 Nm y el equilibrio lo alcanza con un valor de Tx de -34.937 Nm.

#### **❖ Conicidad 1/50**

Siguiendo la tendencia anterior, el mínimo obtenido es menor que en las conicidades anteriores y de valor -26.391 Nm y el equilibrio se alcanza con un valor de -23.521 Nm. Aumentamos la velocidad a 30 m/s y nos da como resultado un mínimo de -36.209 Nm y se va estabilizando a lo largo de la curva hasta obtener un valor al final de la simulación de -34.904 Nm.

#### **❖ Conicidad rueda plana.**

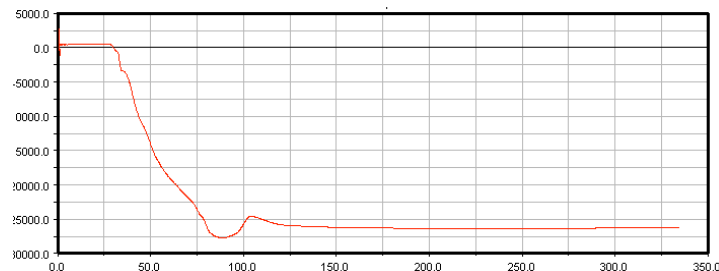
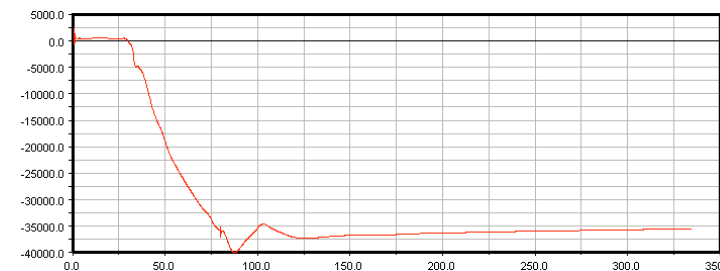
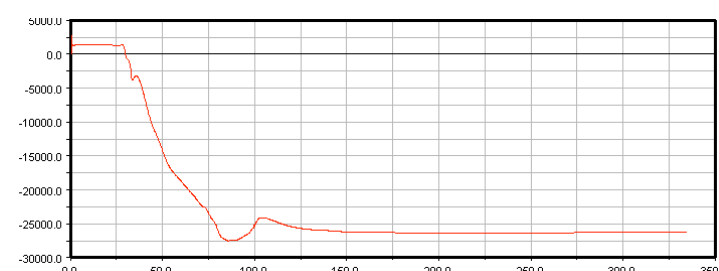
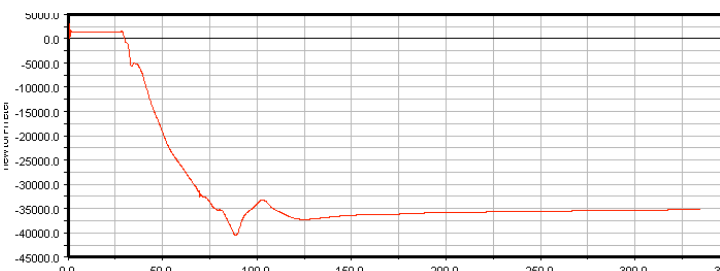
Por último, utilizando esta conicidad, a 20 m/s obtenemos un valor de Tx mínimo de -26.304 Nm y la estabilización se alcanza con un valor de -24.591 Nm. A 30 m/s, el mínimo se ubica con un valor de -40.000 Nm, y posteriormente desciende hasta alcanzar el valor de -35.481 Nm.

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

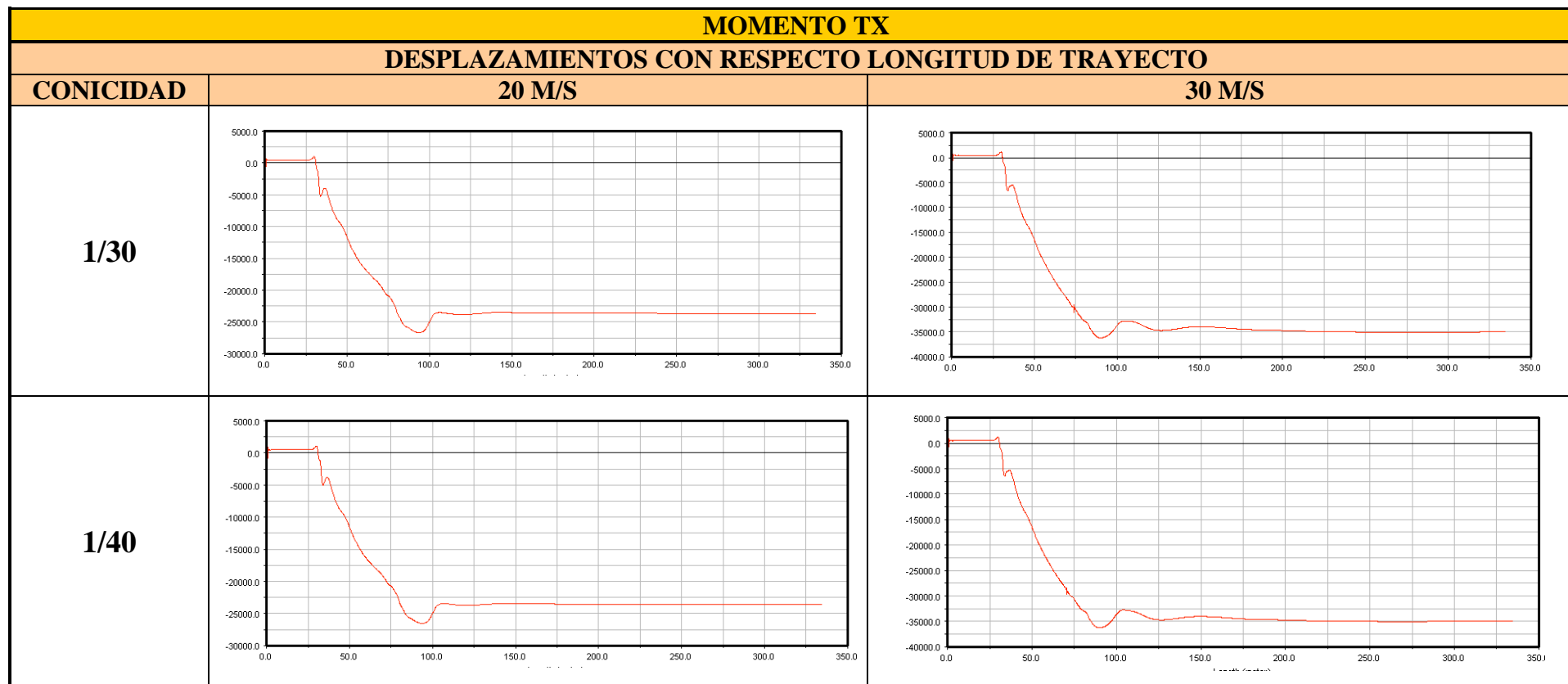
Con los resultados obtenidos podemos concluir que la conicidad afecta al momento  $T_x$ , debido que según la pendiente del perfil va disminuyendo los valores de  $T_x$  obtenidos también son menores. Si aumentamos la velocidad podemos observar como el momento alcanzado al final de la simulación es similar y como la conicidades  $1/40$  y  $1/50$  son las más apropiadas en ambas velocidades.

.

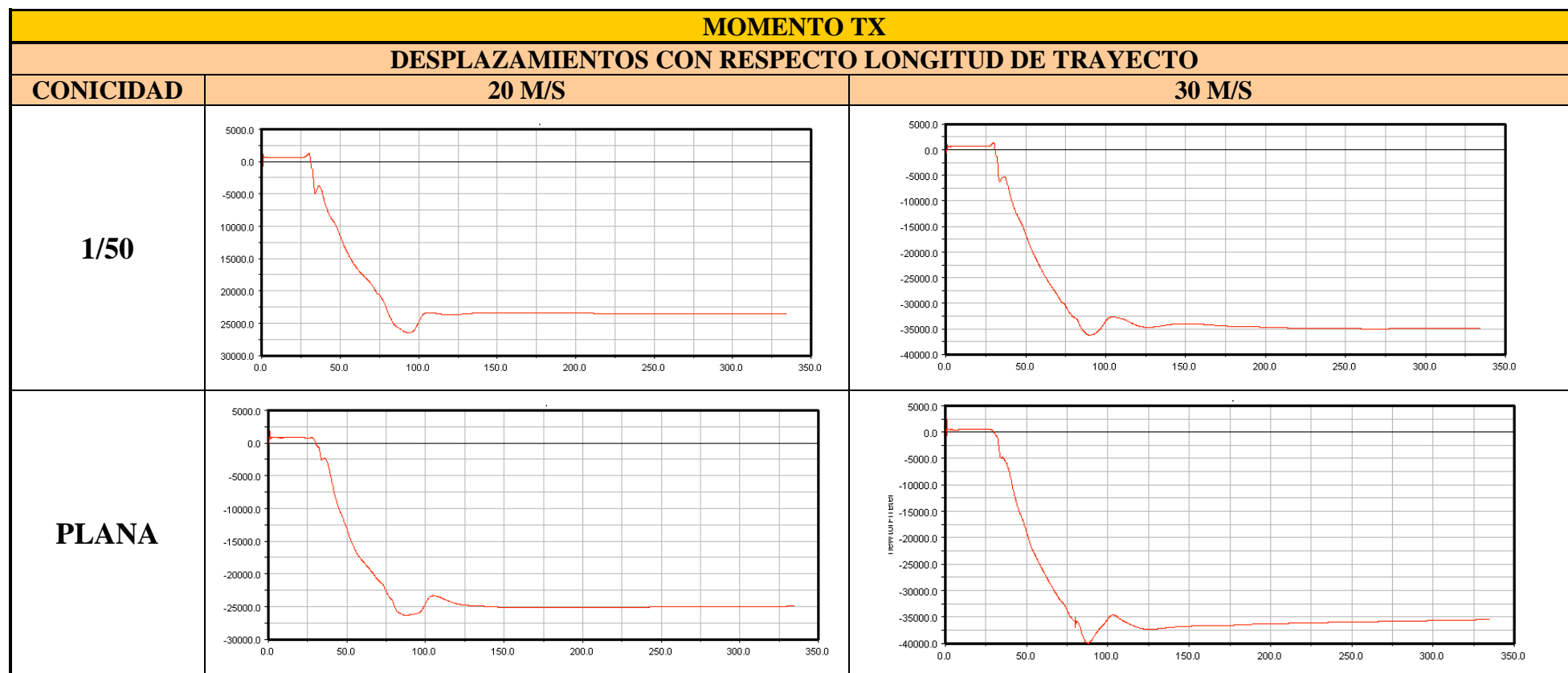
Tabla 68: Momentos Tx en tramo curvo de las conicidades 1/10 ; 1/20.

MOMENTO TX		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

**Tabla 69: Momentos Tx en tramo curvo de las conicidades 1/30 ; 1/40.**



**Tabla 70: Momentos Tx en tramo curvo de las conicidades 1/50 ; plana.**



## V. MOMENTO MY

Las gráficas del momento  $T_y$  se representan en las *tablas 71, 72 y 73*. El eje de ordenadas representa el momento en dirección Y que es la dirección lateral de la vía.

### ❖ Conicidad 1/10

Obtenemos un mínimo antes de entrar en curva de -14.000 Nm y posteriormente se estabiliza a -11.262 Nm a lo largo de la curva. Si aumentamos la velocidad a 30 m/s, el mínimo se obtiene -11.827 Nm y desciende a lo largo de la curva hasta alcanzar el valor de -3.511 Nm.

### ❖ Conicidad 1/20

A 20 m/s obtenemos un mínimo de valor -13.866 Nm y se estabiliza en un valor de -11.388 Nm. A 30 m/s el mínimo es de -12.011 Nm y desciende hasta un valor de -3.630 Nm al final de la simulación.

### ❖ Conicidad 1/30

Con esta conicidad se observa un valor mínimo antes de entrar en la curva de -13.856 Nm y a lo largo del trayecto curvo se estabiliza en un valor de -10.987 Nm. Realizando la misma simulación pero a 30 m/s obtenemos un valor mínimo de -12.017 Nm y desciende hasta un valor final de -3.685 Nm.

### ❖ Conicidad 1/40

El valor mínimo obtenido a la entrada de la curva a 20 m/s es de -13.812 Nm y llega al equilibrio con un valor de -10.926 Nm. A 30 m/s el valor mínimo es -11.999 Nm y desciende hasta el valor de -3.728 Nm.

### ❖ Conicidad 1/50

Con la conicidad de 1/50, el valor mínimo obtenido en la entrada de la curva es de -13.730 Nm y se estabiliza con un valor de -10.866 Nm. Aumentando la velocidad a 30 m/s, los resultados nos muestran un mínimo de -11.969 Nm y un descenso del  $T_y$  hasta el valor de -3.706 Nm.

### ❖ Conicidad rueda plana.

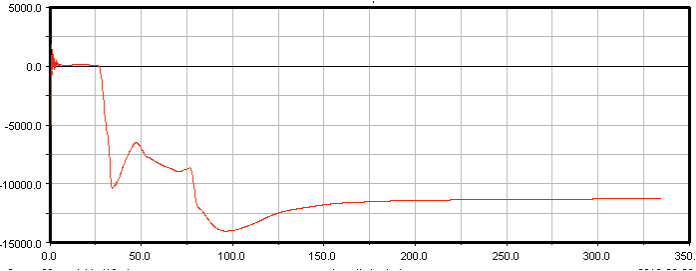
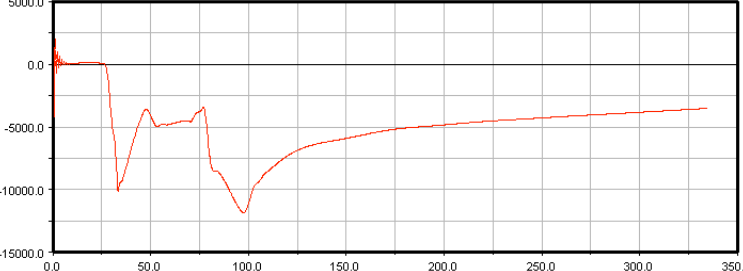
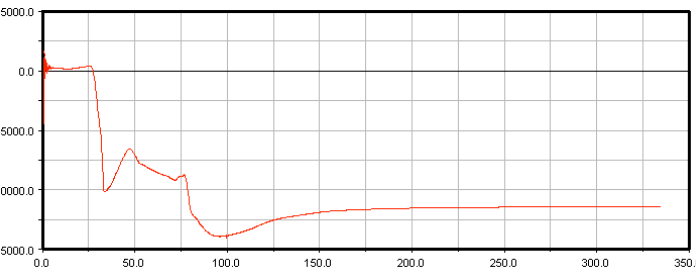
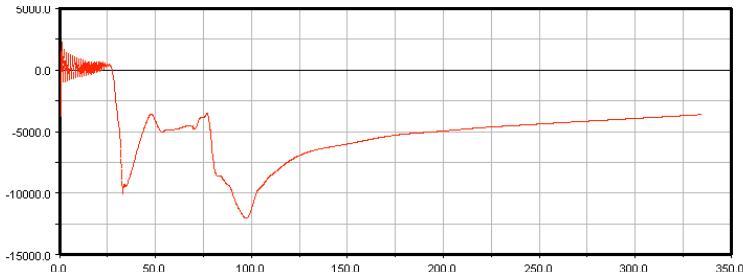
En la entrada en curva, a 97 metros, se obtiene un mínimo de -13.611 Nm y se estabiliza a lo largo de la curva con un valor de -10.991 Nm. Si cambiamos la velocidad de simulación a 30 m/s el mínimo es de valor -11.835 Nm y desciende a -3.491 progresivamente.



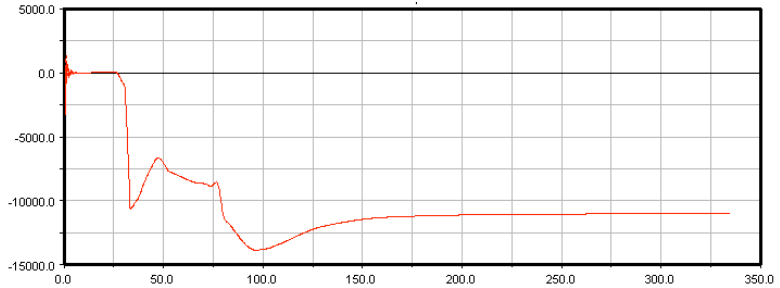
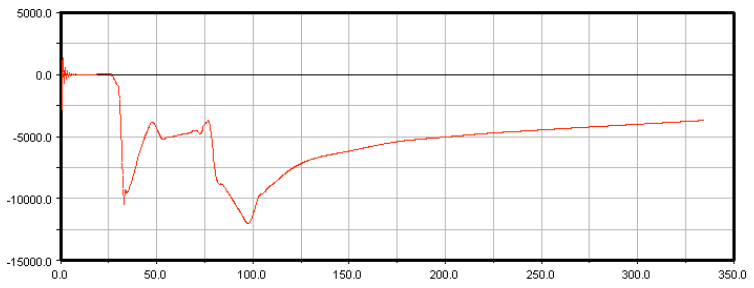
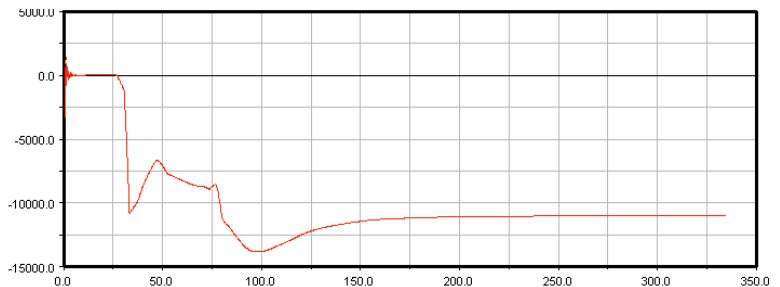
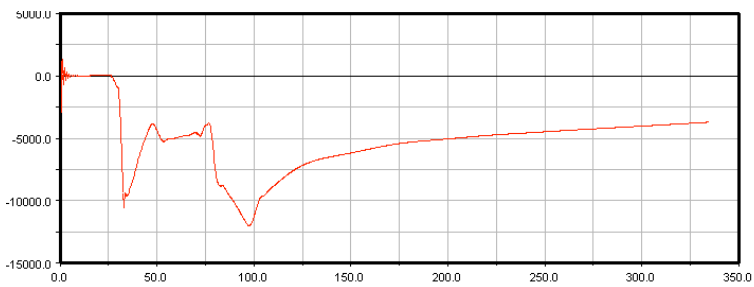
## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En todas las gráficas se puede observar una oscilación inicial debido a los sistemas de suspensión del vehículo. Como nos muestran los resultados se aprecia que a menor conicidad menor es el momento que va a soportar. Sin embargo al aumentar la velocidad estos resultados son contrarios y los momentos  $T_y$  aumentan según vamos disminuyendo la conicidad.

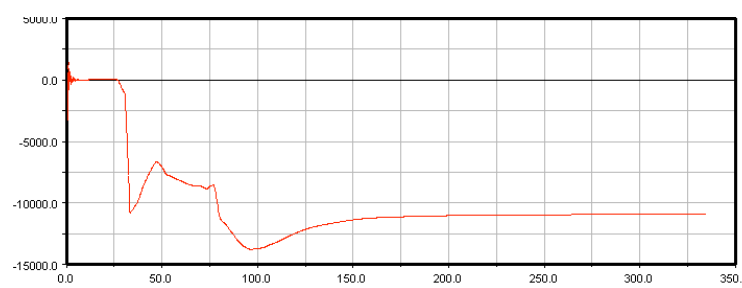
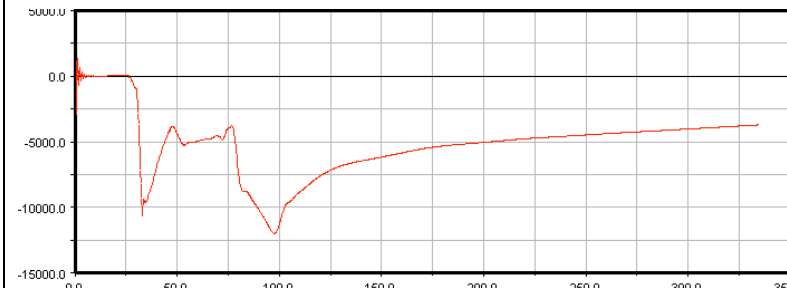
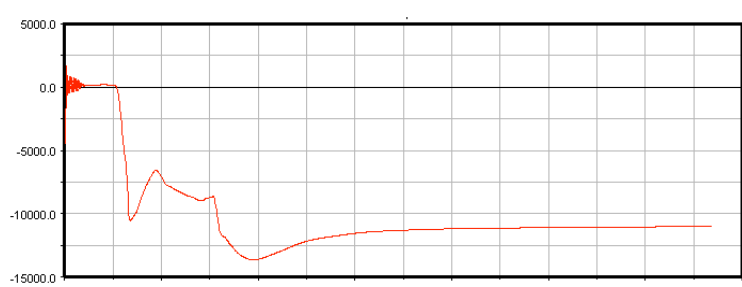
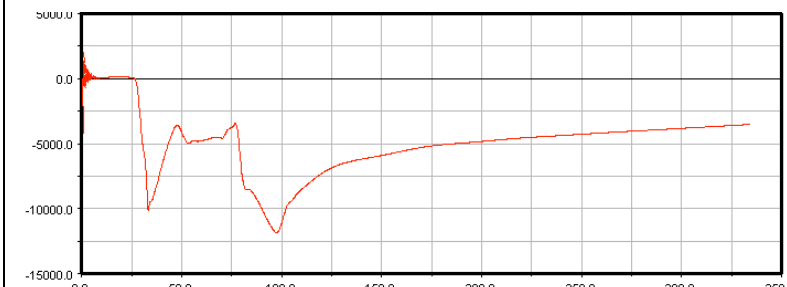
Tabla 71: Momentos Ty en tramo curvo de las conicidades 1/10 ; 1/20.

MOMENTO TY		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICID AD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

*Tabla 72: Momentos  $T_y$  en tramo curvo de las conicidades 1/30 ; 1/40.*

MOMENTO $T_y$		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/30		
1/40		

**Tabla 73: Momentos  $T_y$  en tramo curvo y de las conicidades 1/50 ; plana.**

MOMENTO $T_y$		
DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/50		
PLANA		

## VI. MOMENTO MZ

Las gráficas del momento  $T_z$  se representan en las *tablas 74, 75 y 76*. El eje de ordenadas representa el momento en dirección Z que es la dirección vertical de la vía.

### ❖ Conicidad 1/10

Obtenemos un máximo de 872,5 Nm en la entrada en curva y posteriormente se estabiliza a 615,3 Nm. A 30 m/s se obtiene en la entrada de la curva un valor de 591,1 Nm y desciende a lo largo del trayecto hasta obtener un valor final de -99 Nm.

### ❖ Conicidad 1/20

Aquí el valor máximo obtenido en la entrada en curva es de 865 Nm y se equilibra con un valor de 625 Nm. Si aumentamos la velocidad a 30 m/s el máximo es de 624,16 Nm y desciende hasta el valor de -85,46 Nm.

### ❖ Conicidad 1/30

A 20 m/s máximo obtenido es de 861,8 Nm a 99 metros del inicio del recorrido sobre el eje X y se estabiliza con un valor de 611,5 Nm. Si aumentamos la velocidad a 30 m/s el máximo es de valor 630,47 Nm, y desciende a lo largo del trayecto hasta obtener al final de la simulación un valor de -78,2 Nm.

### ❖ Conicidad 1/40

Con esta conicidad hemos obtenido un máximo de 860 Nm y un estabilización durante la curva de valor 606,8 Nm. Si analizamos ahora la misma simulación pero a 30 m/s obtenemos un máximo de valor 627,6 Nm y desciende hasta -74,8 Nm.

### ❖ Conicidad 1/50

Aquí el valor máximo obtenido es de 856 Nm y se estabiliza en 604,3 Nm. A 30 m/s el máximo es de valor 627,54 Nm y desciende hasta obtener un valor de -75 Nm.

### ❖ Conicidad rueda plana.

Por último tenemos la conicidad plana, con esta hemos obtenido como resultado un máximo a la entrada de la curva de valor 846,38 Nm y una estabilización de valor 605,15 Nm. Si aumentamos la velocidad del vehículo a 30 m/s el máximo es de valor 591 Nm y desciende hasta -99,7 Nm.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

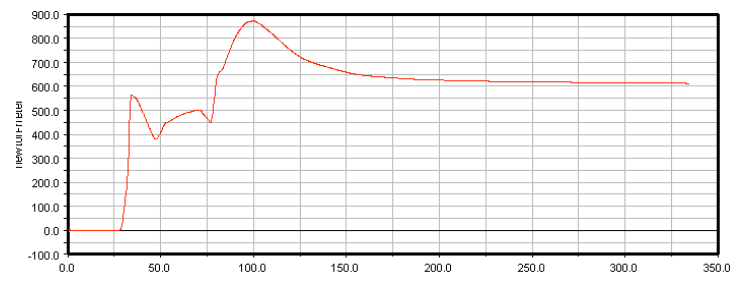
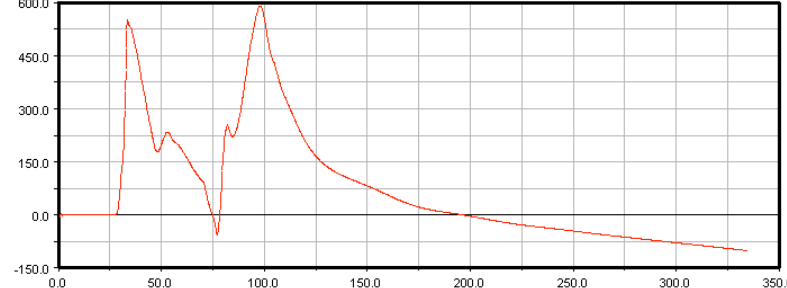
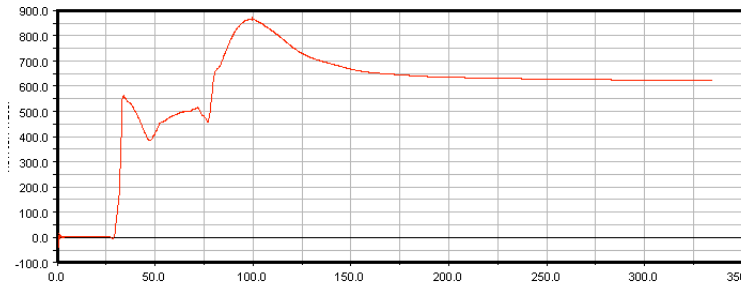
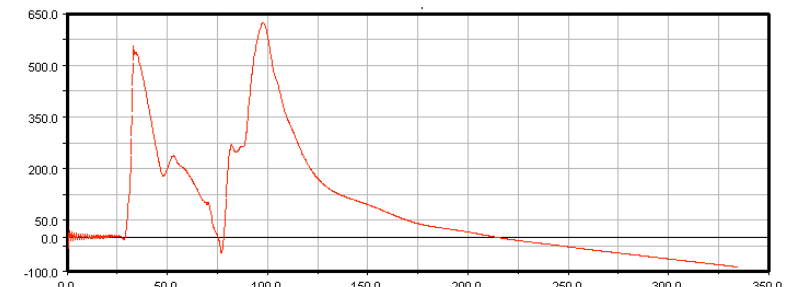
Al realizar las simulaciones y analizar los resultados podemos observar como a medida que la conicidad es menor, en ambas velocidades, los momentos según el eje Z disminuyen. Se aprecia que a 30 m/s el momento es menor que a 20 m/s, esto es debido al nuevo equilibrio de fuerzas comentado anteriormente.

Como hemos podido observar a la hora de estudiar el problema tangencial descrito por Kalker, depende de las fuerzas  $F_x$  de *creepage* de cada rueda del mismo eje, las cuales son prácticamente similares a  $F_x$  analizadas en esta simulación, aplicadas en la elipse de contacto entre la rueda y el rail. Se demuestra que al disminuir estas fuerzas  $F_x$  también lo hace el momento  $T_z$  como cabía esperar y queda expuesto en la teoría de Kalker la cual establece la dependencia existente entre  $T_z$  y  $F_x$ .

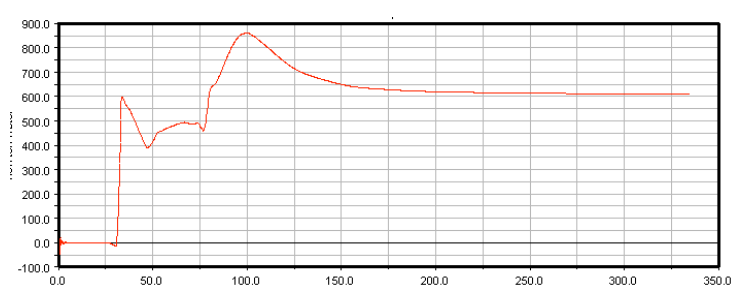
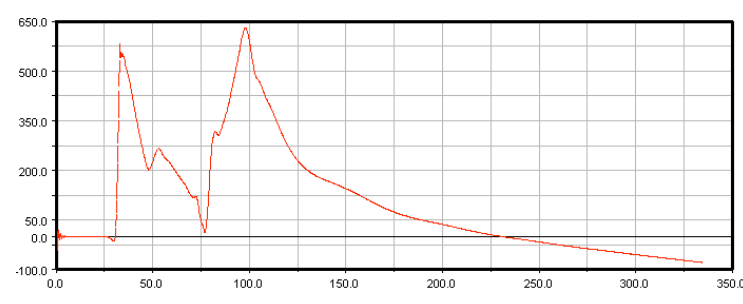
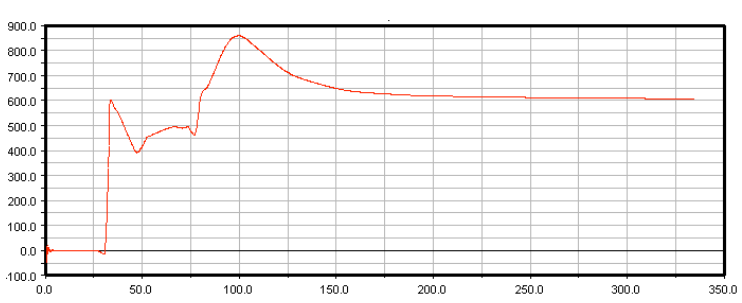
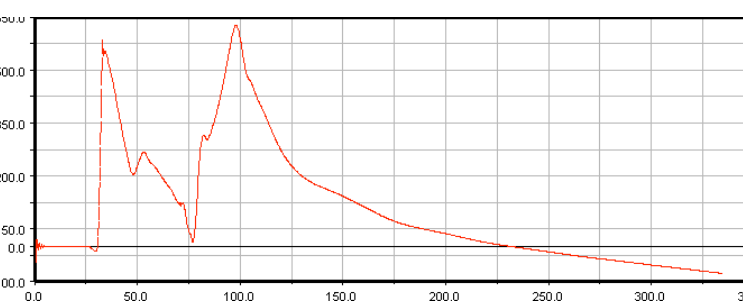
Los resultados también nos muestran que durante el final del trayecto, el momento  $T_z$  cambia de sentido cuando aumentamos la velocidad a 30 m/s, Si volvemos a los resultados de  $F_x$ , se observa pérdida de la  $F_x$  de la rueda izquierda, siendo ésta suficientemente menor que la rueda derecha para que el valor del momento cambie de sentido.

.

Tabla 74: Momentos  $T_z$  en tramo curvo de las conicidades 1/10 ; 1/20.

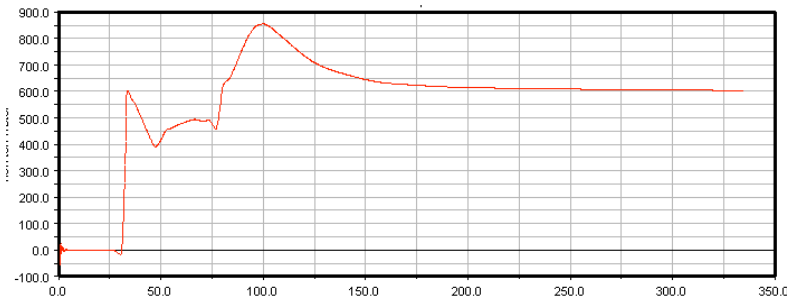
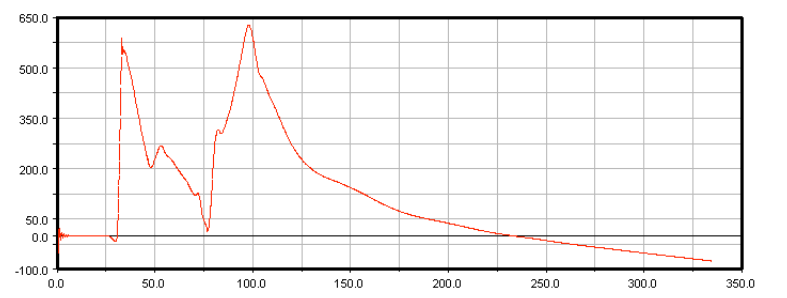
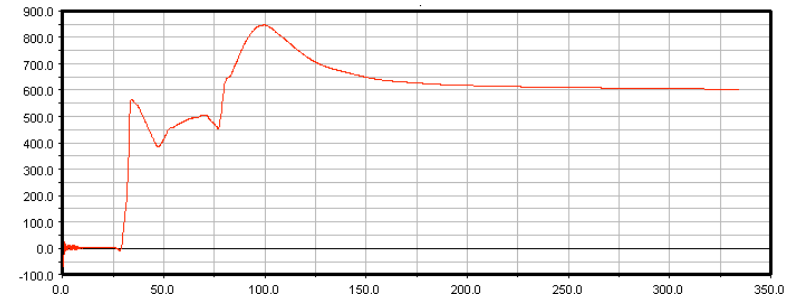
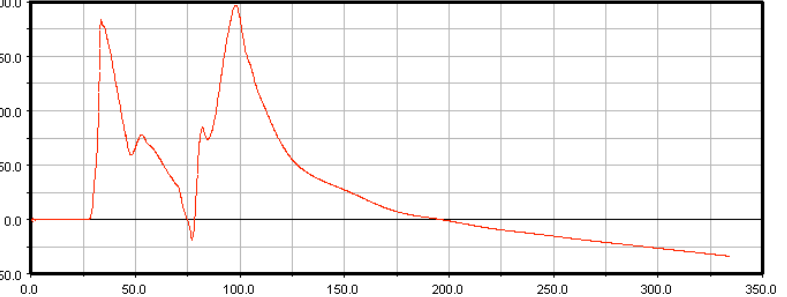
MOMENTO TZ		
MOMENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/10		
1/20		

**Tabla 75: Momentos  $T_z$  en tramo curvo de las conicidades 1/30 ; 1/40.**

MOMENTO $T_z$		
MOMENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/30		
1/40		



*Tabla 76: Momentos  $T_z$  en tramo curvo de las conicidades 1/50 ; plana.*

MOMENTO TZ		
MOMENTOS CON RESPECTO LONGITUD DE TRAYECTO		
CONICIDAD	20 M/S	30 M/S
1/50		
PLANA		



# Capítulo 9

## Conclusiones y trabajos futuros



## 9.1 CONCLUSIONES

Al llegar al final del presente proyecto fin de carrera se puede afirmar que se ha cumplido, a plena satisfacción, el objetivo principal planteado al inicio del mismo: *guía detallada sobre el procedimiento para cambiar la conicidad de las ruedas de nuestro vehículo utilizando el software de simulación MSC. Adams Rail.*

Hay que destacar que se han realizado una serie de aportaciones a nivel docente:

- Descripción de diferentes conceptos ferroviarios necesarios para la realización del Proyecto Fin de Carrera.
- Se ha realizado una descripción del funcionamiento del programa Adams Rail, explicando las características más relevantes del programa.
- Se ha explicado el manejo y conceptos fundamentales del programa Adams Postprocessor necesario para el análisis de los resultados.
- Se ha realizado una descripción de los parámetros que permite representar Adams Postprocessor tras realizar la pertinente simulación en Adams Rail para tener, de esta forma, una correcta comprensión de las posibilidades del programa.
- Se ha creado una guía o manual de usuario sobre el manejo del programa Adams Rail y Adams Postprocessor, para permitir a los alumnos inexpertos adentrarse en el mundo de la simulación ferroviaria.
- Se ha descrito un detallado ejemplo, en este manual, de un vehículo ferroviario existente en el mercado, el tren de alta velocidad tipo Avant serie S-104 de Renfe. Para ello se ha indicado los parámetros más relevantes que son necesarios introducir para el correcto modelado de este vehículo.
- Se ha realizado diferentes vídeos de las simulaciones que permite realizar Adams Rail, que permitan a futuros estudiantes poder visualizar las simulaciones que realiza este programa sin tener que acceder al mismo.

También hemos realizado una serie de aportaciones que facilitarán a los nuevos usuarios la utilización del software.

- Se ha realizado un manual detallado sobre el procedimiento a seguir para cambiar la conicidad de las ruedas de nuestro vehículo ferroviario.
- Se ha implementado y simulado en Adams Rail el funcionamiento del modelo completo del vehículo ferroviario Avant serie S-104 con diferentes conicidades, en una vía recta y en una vía curva ante diferentes velocidades, 20 m/s y 30 m/s.

- Se ha efectuado una selección de los parámetros más significativos o importantes a analizar entre las múltiples variables que permite graficar Adams Postprocessor. En resumen, el punto sobre el que se ha fijado el estudio ha sido el centro de la rueda izquierda, del eje frontal, del bogie delantero. De este punto, los parámetros seleccionados para ser graficados son:
  - Aceleración.
  - Velocidad.
  - Desplazamientos laterales y verticales.
  - Fuerzas en los ejes X, Y, Z.
  - Momentos en el eje X, Y, Z.
- Se ha analizado las principales variables mecánicas del vehículo ferroviario Avant serie S-104 modelado, ante las diferentes condiciones de funcionamiento planteadas.

Para terminar y una vez modelado y simulado el bogie propuesto, se presentarán a continuación las conclusiones de los resultados obtenidos para los diferentes análisis realizados:

- **Análisis de precarga:**

Tras este análisis se ha podido obtener como resultado, que el reparto de cargas mantiene prácticamente la simetría del modelo creado (aproximadamente 91%), por lo que se deduce que está correctamente construido.

- **Análisis lineal:**

Una vez analizado los resultados obtenidos en la simulación obtenemos 13 modos propios de vibración, cuya parte imaginaria que representa el comportamiento oscilatorio, no es igual a cero. Observamos también, que no se encuentran modos propios inestables, aquellos cuya parte real del autovalor es positiva.

- **Análisis dinámico:**

Como se ha descrito en la memoria, se han realizado diferentes simulaciones dinámicas en una vía recta y en una vía curva, a velocidades de 20 m/s y de 30 m/s y conicidades 1/10, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50 y conicidad plana.

Como podemos observar una vez analizados los resultados de las simulaciones, al circular en vía recta, el cambio de conicidad y de velocidad afectará al comportamiento dinámico de nuestro vehículo. Los esfuerzos y desplazamientos aumentarán conforme disminuimos la conicidad. Sin embargo si aumentamos la velocidad, estas diferencias en los esfuerzos y los desplazamientos para las diferentes conicidades, se van igualando y afectará menos el cambio de conicidad.

Circular en una vía curva provoca un aumento progresivo de las fuerzas y de los momentos a medida que se circula por ella, debido a la fuerza centrífuga que tiende a desplazar el vehículo lateralmente hacia el exterior de la curva, hasta llegar a contactar la pestaña del perfil de la rueda con la cabeza del carril. Como conclusión se puede afirmar que, a medida que el radio de la curvatura de la vía sea mayor, o próximo a una vía recta, el vehículo se comportará de una forma más estable.

Así mismo, circular a mayor velocidad en una vía repercute en los resultados obtenidos, aumentando el efecto que provoca cuando circula por vía curva, comportándose el vehículo de una forma menos estable.

La conicidad formado por ambas ruedas del mismo eje, provoca un movimiento lateral en una curva, de tal manera que la rueda exterior está rodando con un radio mayor (debido al ángulo del cono) que el interior. Si en un tramo curvo, el perfil de la rueda no es lo suficientemente cónico como para conseguir una diferencia de radios de rodadura (entre la rueda derecha y la izquierda) necesario, el eje se desplazará lateralmente hasta que la pestaña de la rueda choque con la cabeza del carril. En esta situación, el punto de contacto se localiza sobre la pestaña de la rueda, produciéndose grandes deslizamientos y riesgo de descarrilamiento. Por tanto, es conveniente conseguir un valor de la diferencia de radios de rodadura suficiente antes de que la pestaña contacte con el raíl. Dado las propiedades y características establecidas para las simulaciones, se puede considerar que todas las conicidades tienen  $\Delta r$  (diferencia de radios de rodadura) suficientes para tomar el tramo de vía curvo de 320 metros de radio de curvatura a una velocidad de 30 m/s, consiguiendo que la pestaña no toque excesivamente la cabeza del carril.

## 9.2 TRABAJOS FUTUROS

Debido a la extensión de documentación que requiere llevar a cabo los objetivos propuestos en este documento, se han dejado para futuros proyectos, los siguientes objetivos:

- ❖ Contrastar con datos reales los resultados obtenidos en el presente proyecto con el fin de valorar la idoneidad del modelo realizado, así como del software Adams Rail.
- ❖ Continuar describiendo las características del programa Adams Rail, así como las posibilidades que permite realizar. Esto es debido a que existen numerosas opciones y menús disponibles en el software, que no se han podido explicar con detenimiento, y que podrían ser objeto de estudio, tales como crear nuevas zonas de análisis del vehículo ferroviario como por ejemplo en la caja de grasa.
- ❖ Realizar un estudio del nivel de confort que se obtiene con el modelo creado. Hay que mencionar que existen PFC que se centran en estos estudios, pero ninguno está basado en el vehículo objeto del presente proyecto.

- ❖ Realizar un perfil de rueda real con algún programa auxiliar, como puede ser matlab, y obtener un estudio real sobre el comportamiento del vehículo con esa conicidad.
- ❖ Realizar un análisis comparando el desgaste producido en las ruedas con diferentes conicidades, importante ya que afectará a la seguridad del vehículo, así como a los costes de mantenimiento del mismo.
- ❖ Establecer la conicidad mínima necesaria para tomar una curva con un radio determinado antes de que la pestaña toque la cabeza del carril.
- ❖ Realizar estudios sobre otras herramientas que incorpora MSC Adams, por ejemplo Adams View para realizar simulaciones de un mecanismo, Adams Car para la simulación de la dinámica de un automóvil o Adams Engine para la simulación de un motor.



# Capítulo 10

## Presupuesto





## 10.1 FASES TEMPORALES DE DESARROLLO

Para la elaboración del presente Proyecto Fin de Carrera asido necesario pasar por una serie de etapas cronológicamente establecidas que han facilitado el proceso de elaboración. Estas etapas, de una duración total de 8 meses, abarcan desde la recopilación de información para conocer el manejo del software MSC. Adams Rail, hasta la generación de videos para ayudar a visualizar las simulaciones sin tener que depender del software necesario.

### ❖ 1.Planteamiento de los objetivos del Proyecto Fin de Carrera (1 semana)

La primera fase consistió en la reunión con el tutor para tener una organización inicial del proyecto, así como un establecimiento de los objetivos que se buscan en el mismo. Mencionar, que debido a que

### ❖ 2. Recopilación de información (3 semanas)

Esta fase trató principalmente de buscar información y adquirir los conocimientos necesarios sobre la dinámica de los vehículos ferroviarios y su simulación mediante programas informáticos. Para conseguir este objetivo, se consultó entre otras publicaciones: manuales del programa, libros de la biblioteca, páginas web den Internet y antiguos proyectos fin de carrera.

### ❖ 3. Introducción al programa Adams Rail (6 semanas)

Esta fase consistió en adentrarse en el manejo del software Adams Rail. Para ello se consultaron los manuales que el propio programa incorpora y se realizó el ejemplo que el programa propone. Hay que mencionar que Adams Rail es un software muy complejo y técnico, además de ser poco intuitivo y no estar en castellano, que dificulta aun más su comprensión. Todo esto hizo que se empleara gran cantidad de tiempo en la comprensión y el manejo del programa.

### ❖ 4. Introducción al programa Adams Postprocessor (1 semanas)

Esta fase consistió en el aprendizaje dl software MSC. Adams Postprocessor una herramienta necesaria para el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones. Para llevar a cabo esta tarea nos hemos documentado con manuales, páginas web, etc. ya que hay que tener muy claro que es lo que se quiere estudiar ya que nos permite una gran variedad de posibles análisis.

❖ **5. Recopilación información sobre la geometría de las ruedas y sobre el contacto rueda – carril. (5 semanas)**

Esta fase consistió en la búsqueda de información sobre la geometría de las ruedas de un vehículo ferroviario, así como la relación existente entre esta geometría y el comportamiento del vehículo cuando está en movimiento.

❖ **6. Simulación del tren tipo Avant S-104 con Adams Rail (6 semanas)**

Esta fase consistió en modelar el bogie Avant S-104, así como la creación de los diferentes perfiles de rueda que hemos utilizado para el PFC, utilizando la información recopilada, así como. Hay que destacar que fue necesario ralentizar y detener esta fase debido a diferentes problemas, ya sea por disponer de información insuficiente, de diferentes errores surgidos en la simulación, o fallo del hardware que estábamos utilizando, lo que conllevó a un excesivo tiempo y esfuerzo para conseguir el objetivo final.

❖ **7. Obtención de los resultados mediante Adams Postprocessor (4 semanas)**

Esta fase depende en gran medida de la fase anterior, ya que se realizaron múltiples modificaciones del bogie a modelar. Adams Postprocessor permite crear una amplia variedad de combinaciones diferentes de los resultados obtenidos siendo necesario invertir mucho tiempo en entender la lógica de estos resultados ya que hay que tener muy claro qué se quiere representar.

❖ **8. Realización de vídeos (1 semana)**

Una de las carencias con las que se encontraron a la hora el manejo del programa Adams Rail fue el no disponer de vídeos que mostrasen el poder de simulación de esta herramienta. Empleando el programa Final Cut Pro X se realizaron diferentes vídeos que representan la simulación dinámica y lineal del programa Adams Rail y que pueden ser muy útiles para futuros estudiantes de la materia.

Así mismo, se descargaron diferentes vídeos de páginas web en Internet que representan el tren tipo Avant S-104 de Renfe objeto de modelado y simulación.

❖ **9. Realización de la memoria y el presupuesto (5 semanas)**

Esta fase consistió en la recopilación de toda la información obtenida en las anteriores fases y en la redacción de la memoria, el presupuesto y el plan de trabajo empleando la herramienta Word del software Microsoft Office, OmniPlan v2.2.1, presupuesto y cálculos. Así mismo, para conseguir este objetivo, se consultó entre otras publicaciones: manuales del programa, libros de la biblioteca, páginas web de Internet y antiguos proyectos fin de carrera.

❖ **10. Realización de la presentación (1 semana)**

Esta última fase consistió en la realización de una presentación empleando la herramienta Power Point del software Microsoft Office.

Se muestra en la *tabla 77* el desarrollo temporal de este PFC, donde viene indicado el tiempo empleado en cada fase.

**Tabla 77: Desarrollo temporal del proyecto.**

FASES DE DESARROLLO						
FASE	SEMANA		FASE	SEMANA		
1	1		5	12	7	
2	2			13		23
	3			14		24
						25
					26	
4	15		8	27		
3	5		6	9	28	
	6				29	
	7				30	
	8				31	
	10				32	
4	11			21	10	33
				22		

## 10.2 COSTES

En este proyecto también hay que incluir costes económicos asociados tanto de personal como del material empleado. El tiempo estimado en la realización del presente proyecto viene reflejado de forma global en el apartado anterior.

Durante los 8 meses que se han dedicado a la realización de esta memoria, se ha dividido el tiempo en: 24 horas para la recopilación de información necesaria, 210 horas al diseño y simulación del modelo mediante Adams Rail, 100 horas al análisis y redacción de informes de cálculos mediante Adams Postprocessor, 20 horas para la búsqueda y generación de vídeos y 50 horas a la redacción del informe final del PFC.

Para la realización de este PFC hace falta una estación de trabajo, contando con que no será destinado únicamente al diseño que aquí se trata, que oscilará alrededor de 1.229 €. A dicho coste se le debe añadir el precio de la impresora a color que tiene un valor de 69 €. A todo el equipo se le presupone una depreciación de 24 meses, dedicándole un total de 6 meses al uso de dichos equipos.

Al coste del equipo se le debe añadir el coste de la licencia de MSC Adams, del paquete de Microsoft Office, de, del software OmniPlan y del software Final Cut Pro X, que tienen un coste de 19.500 €, 269,95 €, 180 € y 269,99 € respectivamente. Para este software hemos considerado una amortización de 1/6.

Hay que sumarle los costes de material de oficina, que son a grandes rasgos: folios, bolígrafos y varios a 50 € y cartuchos de tinta a 200 €. Por último se le aplica un aumento de un 15% del total en concepto de costes indirectos.

En la *tabla 78* se muestran los costes económicos desglosados de la realización del proyecto, todo ello nos da un total de **28.594,16 €**

**Tabla 78: Desarrollo de costes del proyecto**

PERSONAL			
Descripción	Horas	Costes por hora [€/h]	Coste imputables [€]
Recopilación de información	24	30	720
Diseño y simulación mediante Adams Rail	210	50	10.500
Análisis y redacción de informes de cálculo	100	60	6.000
Generación de videos	20	35	700
Redacción del informe final	50	60	3.000
Total coste de personal			20.920
EQUIPO <sup>1</sup>			
Descripción	Costes [€]		Coste imputables [€]
Ordenador Apple MacBook Pro con Procesador Intel Core i5.	1.229		307,25
Impresora Canon MG3250	69		17,25
Total coste de equipo			324,50
SOFTWARE <sup>2</sup>			
Programa	Coste licencia por año [€/año]		Costes imputables [€]
Licencia MSC Adams 2005 + Adams Rail	19.500		3.250
Licencia Microsoft Office 2011 para Mac	269,95		44,99
Licencia Omniplan v2.2.1	180		30
Final Cut Pro X	269,99		45
Total coste por software			3.369,99
GASTOS DE MATERIAL DE OFICINA			
Descripción			Coste imputables [€]
Material de oficina consumible			50
Cartuchos de tinta			200
Total coste de material de oficina			250
COSTE BRUTO			24.864,49 €
COSTES INDIRECTOS Y BENEFICIOS			
Descripción			Coste imputables [€]
Costes indirectos de difícil justificación 15%			3.729,67
COSTE TOTAL IMPUTABLE			28.594,16 €

<sup>1</sup> La depreciación del equipo se realiza en 24 meses, dedicándole un uso de 6 meses.

<sup>2</sup> El software tiene una amortización de 1/6.

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de **VEINTIOCHO MIL QUINIENTOS NOVENTA Y CUATRO EUROS CON DIECISEIS CÉNTIMOS.**



# Glosario

PFC	Proyecto Fin de Carrera.
ADAMS	Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems (Análisis Dinámico Automático de Sistemas Mecánicos).
CAD	Computer Aided Design (Diseño Asistido por Computador).
AVE	Alta Velocidad Española.
RENFE	Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles
ANSII	American National Standard Code for Information Interchange (Código Nacional Americano Estándar para Intercambio de Información).





# Referencias

- [1] <http://es.wikipedia.org/wiki/Riel> (Agosto 2012). Enlace web al término “riel” de la enciclopedia libre Wikipedia.
- [2] <http://es.wikipedia.org/wiki/Riel> (Agosto 2012). Enlace web al término “riel” de la enciclopedia libre Wikipedia.
- [3] <http://es.wikipedia.org/wiki/Ferrocarril> (Agosto 2012). Enlace web al término “ferrocarril” de la enciclopedia libre Wikipedia.
- [4] <http://es.wikipedia.org/wiki/Boje> (Agosto 2012). Enlace web al término “boje” de la enciclopedia libre Wikipedia.
- [5] Rubén Manzanque Castellanos. *Estudio del comportamiento en curva del bogie Y25*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2010.
- [6] Alberto Fernández López. *Estudio del nivel de confort en el transporte ferroviario mediante Adams Rail*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2012.
- [7] Julio Álvarez Rodríguez. *El rodaje en el ferrocarril: ruedas* (tomo 1). España: Editorial Juan de la Cuesta. 2010.
- [8] J. Santamaría, J. Herreros, O. Oyarzabal, E.G. Vadillo. *Optimización del perfil de rodadura de una rueda de ferrocarril considerando su conicidad equivalente*. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Asociación Española de Ingeniería Mecánica. 2010.
- [9] Arturo Herreros Garrido. *Estudio de la defectología en ruedas ferroviarias*. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2010.

- [10] Carter, F. W. On the action of a locomotive driving wheel. London: Proc. Royal Soc. Ser. A.Vol.113. 1926.
- [11] Johnson, K. L. The effect of a tangential force upon the rolling motion of an elastic sphere upon a plane. J. Appl. Mech. Vol. 25.1964.
- [12] Johnson, K. L and Vermeulen, P.J. Contact of non-spherical bodies transmitting tangential forces. J. Appl. Mech. Sci. Vol. 31. Capítulo 10 Referencia 172. 1964.
- [13] Haines, J and Ollerton, E. Contact stress distribution on elliptical contact surfaces subjected to radial and tangential forces. Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 177. 1963.
- [14] Halling, J. Microslip between a rolling element and it's track arising from geometric conformity. J. Mech. Eng. Sci. Vol. 6. 1964.
- [15] Kalker, J. J. On the rolling contact for two elastic bodies in the presence of dry friction. The Netherlands: PhD dissertation. Delf University of Technology. 1973.
- [16] Hertz, H. Gesamelte Werke. Vol. 1. Leipzig. 1895.
- [17] Kalker, J. J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact. En: Vehicle System Dynamics. Vol. 11. London: Taylor and Francis. 1983.
- [18] Ayasse, J.B and Chollet, H. Wheel Rail - Contact. En: Iwnicki, S. Handbook of railway vehicle dynamics. Florida: Taylor and Francis. 2006.
- [19] [http://www.ferropedia.es/wiki/Renfe\\_Serie\\_104](http://www.ferropedia.es/wiki/Renfe_Serie_104) (Agosto 2012). Enlace web al término "renfe serie 104" de la enciclopedia web de ferrocarriles Ferropedia.
- [20] Raúl Caracena Lozano. *Implementación, simulación y análisis de un vehículo ferroviario*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2012.
- [21] S.D. Iwnicki. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics* . Taylor & Francis, 2006.
- [22] R. Lewis, U. Olofsson. *Wheel-Rail Interface Handbook*. Woodhead Publishing, 2009.
- [23] T. Jendel. *Prediction of wheel profile wear - comparisons with field measurements* . Wear. 2002.
- [24] Juan Antúnez Marín. *Simulación dinámica de un eje ferroviario con Adams Rail*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Sevilla. 2005.
- [25] Adams Rail Help. Ayuda propia del programa Adams Rail. MSC. Adams. 2005.
- [26] Adams/ Postprocessor Help. Ayuda propia del programa Adams Postprocessor. MSC. Adams. 2005.
- [27] Beatriz Tena Villar. *Railway Design, simulation and analysis by ADAMS/ Rail Software*. Master Thesis. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza. Polonia 2011

# **Anexo**

## **Plan de trabajo**

